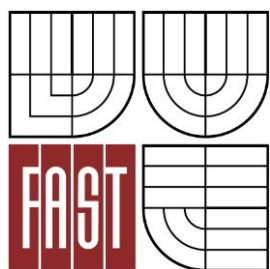




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

## POSOUZENÍ STANOVENÍ ZHUTNITELNOSTI JEMNOZRNNÉ ZEMINY

CONSIDERATIONS OF THE LABORATORY REFERENCE DENSITY FOR FINE SOIL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAN GRMELA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2015




# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jan Grmela
Název	Posouzení stanovení zhutnitelnosti různých typů zemin
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2014
Datum odevzdání bakalářské práce	29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

  
.....  
doc. Dr. Ing. Michal Varaus  
Vedoucí ústavu

  
.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

### **Podklady a literatura**

ČSN EN 13286-2, 3, 4, 5 Laboratorní metody na stanovení zhutnitelnosti zemin  
ČSN EN 13286-41 ... Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickým pojivem  
ČSN EN 13286-42 ... Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v příčném tahu směsí stmelených hydraulickým pojivem  
veřejně přístupné články a literatura z internetu  
výzkumné zprávy zabývající se danou problematikou  
bakalářské a diplomové práce z minulých let zabývající se podobnou problematikou  
sborníky českých a zahraničních technických konferencí  
apod.

### **Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)**

Vypracování bakalářské práce je podmíněno studiem o zhutňování směsí a materiálů a zkoušení pevnosti v tlaku a příčném tahu zkušebních těles. Pro přijetí bakalářské práce k obhajobě je nutné splnit následující:

1. teoretické sledování závislosti zhutnitelnosti na různých charakteristikách zemin
2. experimentální zkoušení vybraných 3 typů směsí. Stanovení zhutnitelnosti a zkoušení pevností na zkušebních tělesech vytvořených z vybraných směsí stmelených hydraulickým pojivem.

### **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Tato práce si klade za cíl popsat problematiku zhutnitelnosti zemin. Představuje konkrétní zkušební metody zhutnitelnosti, jejich principy a postup provedení. Praktická část je zaměřena na laboratorní zkoušení vzorku jemnozrnné zeminy. Zemina je hutněna různými metodami. Podle výsledků hutnění je dále podrobena laboratornímu zkoušení na okamžitý index únosnosti (IBI) a poměru únosnosti (CBR) po čtyřdenní saturaci ve vodě. Výsledkem práce je posouzení dosažených výsledků a výběr nejpříznivější metody pro jemnozrnný materiál.

## **Klíčová slova**

zeminy, zhutnění, Proctor standard, Proctor modifikovaný, vibrační pěch, okamžitý index únosnosti, kalifornský poměr únosnosti

## **Abstract**

The aim of this thesis is to describe the field of the soil compaction. The thesis introduces the particular test methods of the soil compaction, their principles and the implementation techniques. The practical part deals with the examination of a fine-grained sample in a laboratory condition. The compaction is achieved by various methods. In accordance with the compaction results, the soil is further examined for the Immediate Bearing Index (IBI) and California Bearing Ratio (CBR) after four day long saturation in water. The examination of the achieved results and finding the most suitable method for the fine-grained material is the outcome of the thesis.

## **Keywords**

soil, compaction, Proctor standard, Proctor modified, vibrating hammer, immediate bearing index, California bearing ratio

## **Bibliografická citace VŠKP**

Jan Grmela *Posouzení stanovení zhutnitelnosti jemnozrné zeminy*. Brno, 2015. 64 s., 9 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24.5.2015

.....  
podpis autora  
Jan Grmela

# PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24.5.2015

.....  
podpis autora  
Jan Grmela

## **OBSAH**

<b>1</b>	<b>ÚVOD A CÍL PRÁCE.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>11</b>
2.1	Zeminy .....	11
2.2	Základní rozdělení zemin .....	11
2.2.1	Nesoudržné zeminy.....	11
2.2.2	Soudržné zeminy.....	11
2.2.3	Základní zkoušky zemin .....	11
2.3	Zatřídění zemin podle vhodnosti pro pozemní komunikace .....	13
2.4	Zhutnitelnost zemin.....	15
2.4.1	Zhutnění .....	15
2.4.2	Vliv energie .....	16
2.5	Proctorova zkouška standardní .....	18
2.5.1	Další zařízení .....	20
2.5.2	Příprava vzorků .....	20
2.5.3	Postup zkoušky .....	22
2.6	Proctorova zkouška modifikovaná .....	23
2.6.1	Postup zkoušky .....	23
2.6.2	Grafické vyjádření .....	24
2.7	Vibrační pěch .....	25
2.7.1	Zkušební zařízení.....	25
2.7.2	Další zařízení .....	26
2.7.3	Příprava zkušebního vzorku .....	26
2.7.4	Postup zkoušky .....	26
2.7.5	Grafické vyjádření .....	27
2.8	Metody stanovení zhutnitelnosti v Evropských zemích .....	28



<b>3</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>30</b>
3.1	Příprava vzorku .....	30
3.2	Proctor standard .....	32
3.2.1	Výsledky zkoušky Proctor standard.....	33
3.3	Proctor modifikovaný .....	34
3.3.1	Výsledky zkoušky Proctor modifikovaný.....	35
3.4	Vibrační pěch.....	36
3.4.1	Výsledky zkoušky Vibrační pěch .....	37
3.5	Vyhodnocení zkoušky .....	40
3.6	Porovnání laboratorních zkoušek .....	41
3.7	Zkušební metoda pro stanovení CBR a IBI.....	42
3.7.1	Účel zkoušky .....	42
3.8	Zkouška CBR a IBI .....	43
3.8.1	Vyhodnocení zkoušky .....	45
<b>4</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>50</b>
<b>6</b>	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>53</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>54</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM ROVNIC.....</b>	<b>54</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>55</b>

# 1 Úvod a cíl práce

Stanovením zhutnitelnosti zemin se snažíme nalézt optimální vlhkost materiálu při maximální suché objemové hmotnosti a to tak, že mechanickým způsobem odstraňujeme vzduchové póry z materiálu. Díky tomu dosáhneme lepších vlastností zeminy. K nalezení optimální vlhkosti a maximální suché objemové hmotnosti používáme laboratorní zkoušky.

Tato bakalářská práce si klade za cíl popsat problematiku zhutnitelnosti zemin, popsat konkrétní zkušební metody zhutnitelnosti, jejich principy a postup provádění, podrobit jemnozrný materiál laboratornímu zkoušení a poukázat na působení vlivů jednotlivých metod ke stanovení objemové hmotnosti v závislosti na vlhkosti. Na základě výsledků hutnícími metodami materiál otestovat na okamžitý index únosnosti ihned po zhutnění (IBI) a kalifornský poměr únosnosti (CBR) po čtyřdenní saturaci ve vodě. Výsledkem práce je posouzení dosažených výsledků a výběr nejpříznivější metody pro jemnozrný materiál.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Zeminy

Zeminy patří mezi nejpoužívanější stavební materiál v inženýrském stavitelství. Před započítím stavebních prací je nutnost znát jejich vlastnosti. Teprve potom můžeme rozhodnout o jejich použití při stavbě zemního tělesa, o způsobu jejich těžby, dopravy a zabudování. [1]

Zemina je sypká nebo slabě zpevněná, snadno rozpojitelná hornina. Zeminy vznikají jako produkt rozpadu pevných hornin v průběhu mechanického a chemického zvětrávání. K tomuto jevu dochází buď na místě, nebo je materiál přemísťován například vodou, větrem, či ledovcem a tím vznikají nánosy jako například spraš, sprašová hlína. [2],[12]

### 2.2 Základní rozdělení zemin

#### 2.2.1 Nesoudržné (hrubozrnné) zeminy

Nesoudržné zeminy jsou takové, u kterých mezi zrny nepůsobí žádné přitažlivé vnitřní síly. Každé jejich zrno za sucha je odděleno od ostatních zrn, pevnost je zajištěna pouze třením mezi jednotlivými zrny. Velikost zrn je větší než 0,063 mm. [2]

#### 2.2.2 Soudržné (jemnozrnné) zeminy

Soudržné zeminy mají velmi malá zrna  $\leq 0,063$  mm ve více jak 35% hmotnosti obsahu, které se navzájem přitahují a vytvářejí tak formovatelnou látku. Nasáváním vody mohou bobtnat a vysoušením se smršťovat. V suchém stavu jsou křehké, ve vlhkém stavu jsou tvárné a lepivé. [2]

#### 2.2.3 Základní zkoušky zemin

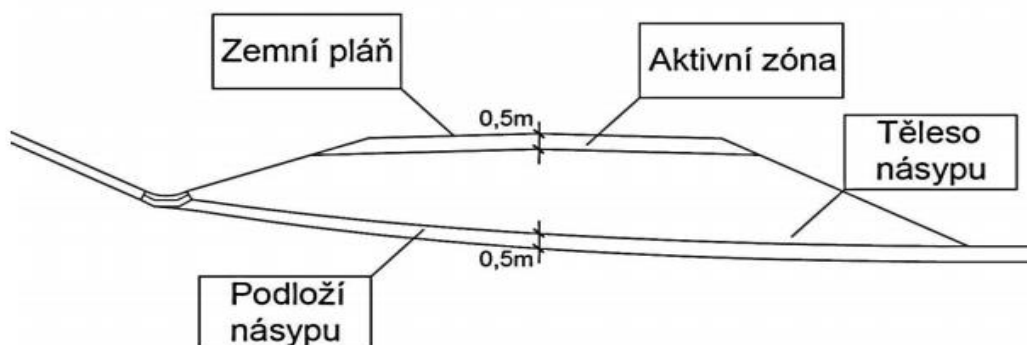
- stanovení zrnitosti

- mez tekutosti
- mez plasticity
- mez smršťování
- index plasticity
- index konzistence
- zhutnitelnost
- okamžitý index únosnosti (IBI)
- poměr únosnosti (CBR)
- přímá zkouška namrzavosti zemin
- relativní ulehlost

**Tabulka 1: Rozdělení podle velikosti zrn [3]**

Skupiny zemin	Frakce	Značka	Velikost zrn [mm]
velmi hrubozrnná zemina	velký balvan	Lbo	od 630
	balvan	Bo	od 200 do 630 včetně
	valoun	Co	od 63 do 200 včetně
hrubozrnná zemina	štěrk	Gr	od 2,0 do 63 včetně
	hrubozrnný štěr	CGr	od 20 do 63 včetně
	střednězrnný štěr	MGr	od 6,3 do 20 včetně
	jemnozrnný štěr	FGr	od 2,0 do 6,3 včetně
	písek	Sa	od 0,063 do 2,0 včetně
	hrubozrnný písek	Csa	od 0,63 do 2,0 včetně
	střednězrnný písek	Msa	od 0,2 do 0,63 včetně
jemnozrnná zemina	jemnozrnný písek	Fsa	od 0,063 do 0,2 včetně
	prach	Si	od 0,002 do 0,063 včetně
	hrubozrnný prach	Csi	od 0,02 do 0,063 včetně
	střednězrnný prach	Msi	od 0,0063 do 0,02 včetně
	jemnozrnný prach	Fsi	od 0,002 do 0,0063 včetně
	jíl	Cl	do 0,002 včetně

## 2.3 Zatřídění zemin podle vhodnosti pro pozemní komunikace



Obrázek 1: Příčný řez pozemní komunikací [15]

Podle normy ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací, rozdělujeme zeminy na nepoužitelné, nevhodné, podmíněčně vhodné a vhodné podle tabulky 2.

Tabulka 2: Použitelnost zemin pro stavbu tělesa [4]

	<b>NEPOUŽITELNÉ<sup>a</sup></b> k jakémukoli použití	<b>NEVHODNÉ</b> k přímému použití bez úpravy	<b>PODMÍNEČNĚ VHODNÉ</b> k přímému použití bez úpravy	<b>VHODNÉ</b> k přímému použití bez úpravy
<b>Podmínky použití</b>	Nelze upravit běžnými technologiemi, použití se zpravidla vylučuje	Musí se vždy upravit <sup>c</sup>	Podle dalších vlastností se rozhodne, zda lze použít přímo bez úpravy nebo zda se musí upravit	Lze použít přímo bez úpravy
<b>Aktivní zóna</b>	Organické zeminy s obsahem organických látek větším než 6 % <sup>b</sup> (bahno, rašelina, humus, ornice), CE, ME	ML, MI, CL, CI MH, MV, CH, CV	S-F MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC	SW, GW, G-F
<b>Násyp</b>		MH, MV, CH, CV	MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC ML, MI, CL, CI	SW, GW, G-F S-F

<sup>a</sup> Netýká se podloží násypu a svahů zářezu.  
<sup>b</sup> Obsah 6 % je hranice pro středně organické zeminy podle ČSN EN ISO 14688-2.  
<sup>c</sup> Neplatí pro poddajnou vrstvu vrstevnatého násypu.

Zeminy pro stavbu zemního tělesa se posuzují podle skutečných vlastností a to následujícím způsobem:

- Zeminy se musí upravit, pokud je mez tekutosti  $w_L > 50\%$  nebo stupeň konzistence  $I_c \leq 0,5$  nebo  $\rho_{dmax\ PS} < 1500\text{ kg/m}^3$  pro násyp;  $\rho_{dmax\ PS} < 1600\text{ kg/m}^3$  pro aktivní zónu
- Upravovat se musí objemově nestabilní zeminy, jako jsou například bobtnavé jíly nebo jílovité břidlice
- Zemina se musí upravit, pokud  $w_n$  se nepohybuje v přípustném intervalu vlhkosti a tuto vlhkost nelze ovlivnit nebo se jedná o zeminu stejnozrnnou (např. vátý písek)
- Pro použití do násypu se zeminy posuzují podle indexu únosnosti IBI. Bez úprav se zeminy použijí, pokud je hodnota IBI rovna min. 10% pro násyp a 5% pro podloží násypu. Pro ztužující vrstvu vrstevnatého násypu se posuzují zeminy podle kalifornského poměru únosnosti CBR. Hodnota CBR min. 10%. Pro účely návrhu se použitelnost posuzuje podle dalších vlastností, jako jsou například zhutnitelnost, pevnostní parametry, stlačitelnost apod.
- Při použití do aktivní zóny se zeminy dále posuzují podle CBR. Pokud je hodnota CBR min. 15%, zeminu je možné použít bez úprav.
- O úpravě zeminy rozhoduje dopravní význam pozemní komunikace a vlhkost při stavbě a v provozovaném zemním tělese. [4]

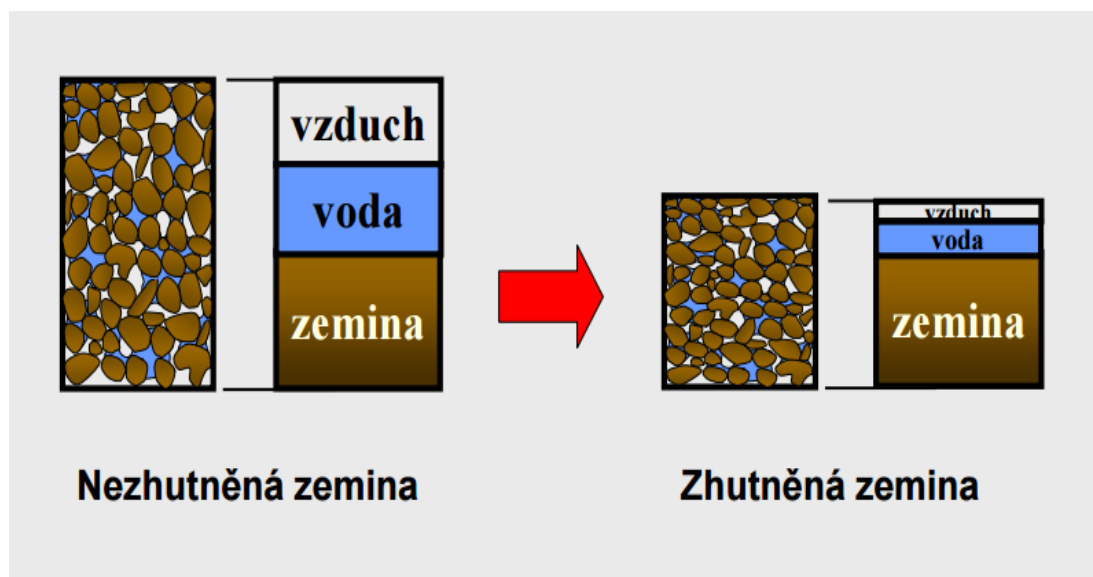
## 2.4 Zhutnitelnost zemin

V mé bakalářské práci se dále zabývám zhutnitelností zemin, což je pro použití zeminy do pozemní komunikace velmi důležitá vlastnost.

Každou zeminu při jejím zabudování do zemního tělesa silniční komunikace je třeba optimálně zhutnit. Zhutňovat lze všechny druhy zemin a další materiály zabudované do zemních konstrukcí jako je například popílek, hlušina, druhotné kamenivo apod. Zhutnitelnost zemin závisí na granulometrickém složení, tvaru zrn, pevnosti zrn, podílu a vlastnostech výplně jemných částic a zejména na vlhkosti. [1]

### 2.4.1 Zhutnění

„Zhutnění je eliminace vzduchových pórů ze zeminy mechanickým způsobem pomocí zhutňovacích prostředků.“ [5]



Obrázek 2: Nezhutněná a zhutněná zemina [5]

Tato technologie slouží pro zvýšení pevnosti a únosnosti, snižuje možnost sedání, předchází poškození mrazem, zlepšuje stabilitu, omezuje propustnost vody. [6]

Zeminy podle zhutnitelnosti rozdělujeme do čtyř skupin:

- 1. skupina – výborná zhutnitelnost, rychlý přírůstek hmotnosti
- 2. skupina – dobrá zhutnitelnost, potřebná je vyšší energie pro zhutnění
- 3. skupina – vyhovující, potřebná je vyšší energie pro zhutnění
- 4. skupina – nevyhovující

Ke stanovení maximální objemové suché zeminy  $\rho_{dmax}$  a optimální vlhkosti slouží laboratorní zkoušky.

Metody pro laboratorní zkoušení:

- Proctor standard - ČSN EN 13286 - 2
- Proctor modifikovaný - ČSN EN 13286 – 2
- Vibrokomprese – ČSN EN 13286 - 3
- Vibrační pěch - ČSN EN 13286 - 4

### 2.4.2 Vliv energie

Se zvýšením energie se objemová hmotnost  $\rho_d$  zvyšuje a optimální vlhkost  $w_{opt}$  se snižuje. Zemina se tak stává ulehlejší s menší vlhkostí. To znamená, že má větší smykovou pevnost a menší stlačitelnost. [5]

**Rovnice 1: Hutnící energie [5]**

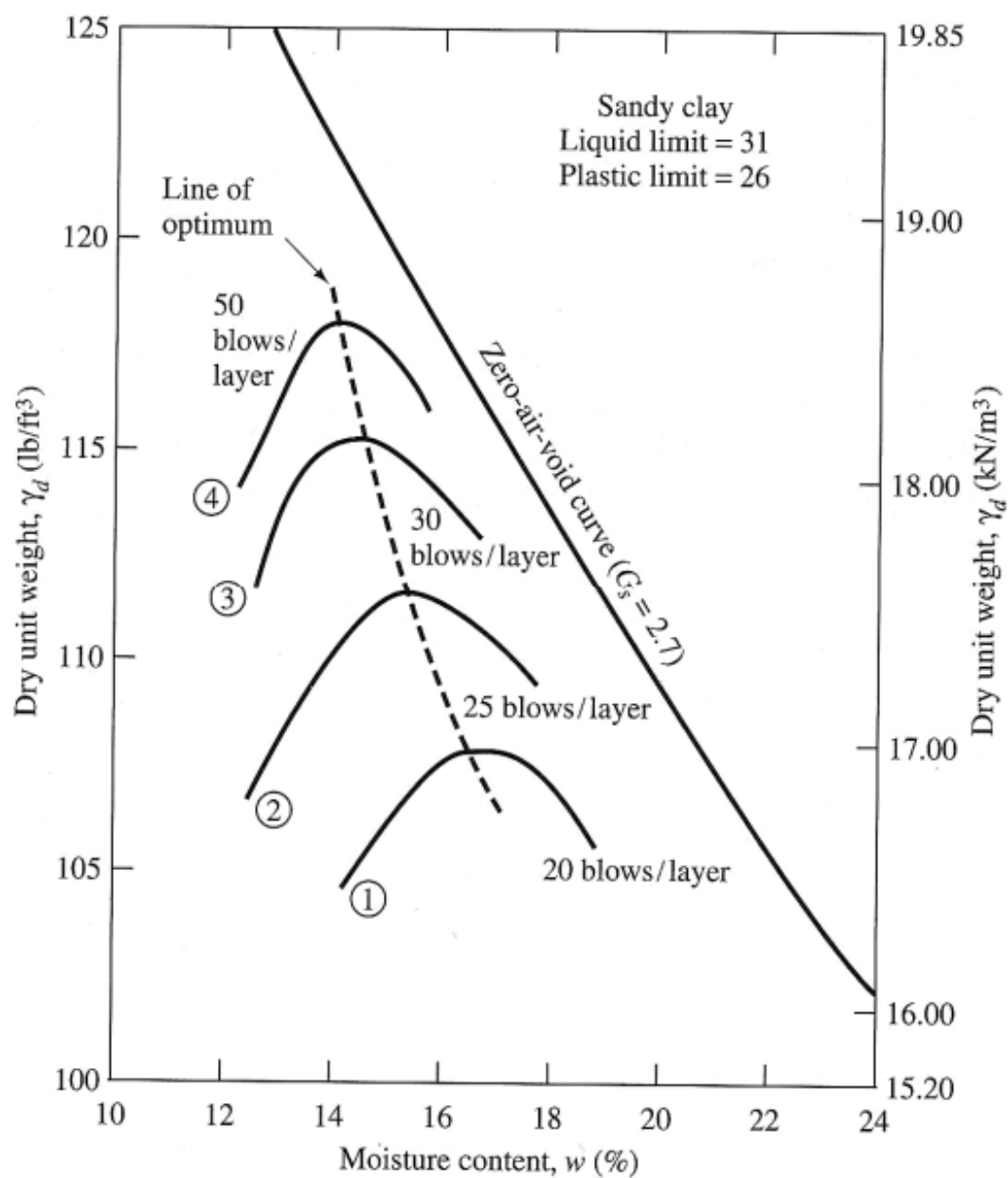
$$E = \frac{m * g * h * n * i}{V}$$

(1)

kde	m	hmotnost pěchu
	g	gravitace
	h	výška dopadu
	n	počet vrstev
	i	počet úderů na vrstvu
	V	objem formy
	E	Hutnící energie



Hutnící energie pro standardní Proctorovu zkoušku má být v rozmezí 0,56 MJ/m<sup>3</sup> až 0,63 MJ/m<sup>3</sup>. Pro modifikovanou Proctorovu zkoušku má být v rozmezí 2,56 MJ/m<sup>3</sup> až 2,80 MJ/m<sup>3</sup>. [5]



Obrázek 3: Účinek hutnící energie [6]

## 2.5 Proctorova zkouška standardní

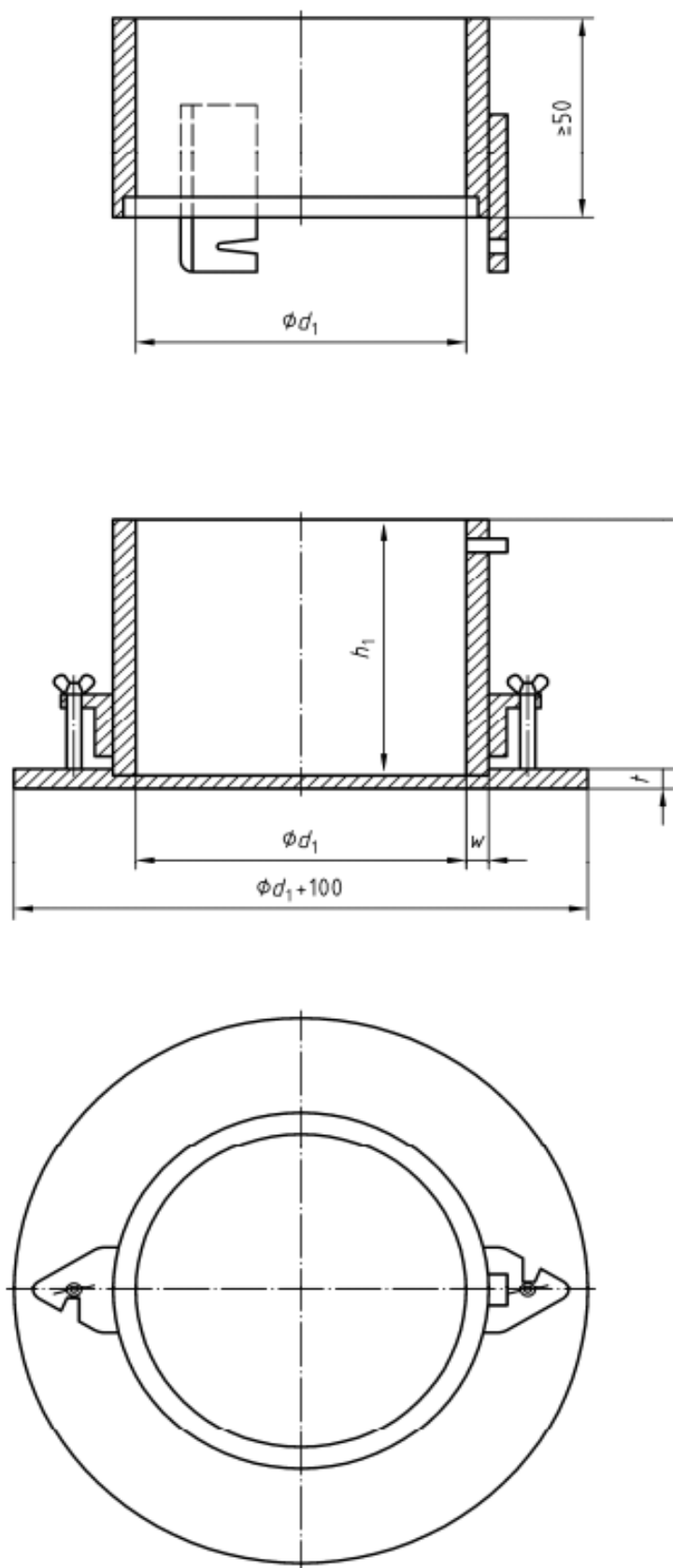
Zhutnitelnost zemin se vyjadřuje maximální objemovou hmotností  $\rho_{dmax}$ , které se dosáhne určitým zhutněním zeminy v normové formě za použití normového pěchu při optimální vlhkosti  $w_{opt}$ . U standardní Proctorovy zkoušky používáme normový pěch o hmotnosti 2,5 kg, který dopadá z výšky 305 mm. Hlavní požadavky na pěchy jsou uvedeny v tabulce 4. Velikost formy se zvolí podle hodnoty  $D$ . Zkušební metoda je nevhodná, pokud více než 25% materiálu nepropadne zkušebním sítem o velikosti 63 mm. Formy rozdělujeme na Proctorovu formu (A), širokou Proctorovu formu (B) a na velmi širokou Proctorovu formu (C). Průměr formy musí být minimálně čtyřnásobkem hodnoty  $D$  směsi. Hodnoty forem musí odpovídat hodnotám uvedeným v tabulce 3. Velikost Proctorovy formy měříme posuvným měřidlem s přesností na 0,5 mm. [7]

Tabulka 3: Rozměry forem [7]

Proctorova forma	Průměr $d_1$ (mm)	Výška $h_1$ (mm)	Tloušťka stěny $w$ (mm)	Tloušťka základní desky $t$ (mm)
A	100,0±1,0	120,0±1,0	7,5±0,5	11,0±0,5
B	150,0±1,0	120,0±1,0	9,0±0,5	14,0±0,5
C	250,0±1,0	200,0±1,0	14,0±0,5	20,0±0,5

Tabulka 4: Požadavky na pěchy [7]

Pěch	Hmotnost pěchu $m_R$ (kg)	Průměr základu $d_2$ (mm)	Výška dopadu $h_2$ (mm)
A	2,50±0,04	50,0±0,5	305±3
B	4,50±0,04	50,0±0,5	457±3
C	15,00±0,04	125,0±0,5	600±3



Obrázek 4: Proctorova forma [7]

### 2.5.1 Další zařízení

- Zkušební síta
- Váhy
- Nerezový plech nebo plastová mísicí nádoba
- Špachtle, ploché hladítko nebo podobný nástroj
- Ocelové urovnávací pravítko
- Vernierův hloubkoměr s přesností na 0,02 mm
- Laboratorní míchačka s objemem nejméně 0,01 m<sup>3</sup>
- Odměrné válce se stupnicí 100ml, 500 ml, 1000ml.

### 2.5.2 Příprava vzorků

Hutnění vzorku směsi se provádí ve zkušební formě, jehož rozměry jsou závislé na maximální velikosti zrna vzorku směsi. Požadované množství vzorku a velikost formy, se volí podle tabulky 5. [7]

Tabulka 5: Příprava vzorku [7]

Procento propadu zkušebními síty			Hmotnost vzorku (kg)	Proctorova forma
16 mm	31,5 mm	63 mm		
100			15	A
			40	B
75 až 100	100		40	B
<100	75 až 100	100	40	B
	<100	75 až 100	200	C

#### *2.5.2.1 Směsi, které propadnou zkušebním sítem 16 mm*

Počáteční vzorek se rozdělí na 5 nebo i více zkušebních vzorků, každý o hmotnosti přibližně 2,5 kg pro formu A a 6 kg pro formu B. Každý vzorek se důkladně promíchá s odlišným množstvím vody, čímž se získá vhodné rozmezí vlhkostí. Důležité je, aby se voda důkladně a dostatečně promíchala se směsí, jinak by mohlo dojít k nedostatečnému promísení, což má za následek proměnlivé výsledky zkoušky. Rozsah vlhkosti musí být takový, aby nejméně dvě hodnoty ležely v obou směrech od optima, při kterém je dosažena maximální objemová hmotnost suché směsi. Pokud směs na počátku obsahuje příliš mnoho vody, je nutné ji nechat vysušit na vzduchu na nejnižší vlhkost, při které se má směs hutnit. Pokud je to nezbytné pro dosažení požadované vlhkosti, sníží se vlhkost materiálu vysoušením v sušárně při teplotě 45°C až 50°C. [7]

#### *2.5.2.2 Směsi, které propadnou zkušebním sítem 31,5 mm*

Počáteční vzorek se rozdělí na 5 nebo více zkušebních vzorků, každý o hmotnosti přibližně 6 kg. Dále se postupuje jako u směsi, které zcela propadnou zkušebním sítem s velikostí otvorů 16 mm. [7]

#### *2.5.2.3 Směsi, které ze 75% až 100% propadnou zkušebním sítem 31,5 mm*

Nadsítný zachycený materiál na zkušebním síti s velikostí otvorů 31,5 mm se odstraní a zváží. Je potřeba stanovit objemovou hmotnost pevných částic  $p_{so}$  a obsah vody v nadsítném  $w_o$ . Materiál, který propadne sítem, se rozdělí na 5 nebo více vzorků směsi o hmotnosti přibližně 6 kg a dále se postupuje jako u směsi, které zcela propadnou zkušebním sítem s velikostí otvorů 16 mm. [7]

### **2.5.3 Postup zkoušky**

#### **3.5.3.1 Proctorova zkouška pro směsi hutněné pěstem (A) v Proctorově formě (A) a (B)**

Pro formu A i B se používá pěst o hmotnosti 2,5 kg, který dopadá na směs z výšky 305 mm. Směs je hutněna ve 3 vrstvách. Forma s připevněnou základní deskou se zváží s přesností na 1 g, připevní se nástavec a sestava se umístí na pevný podklad. Z jednoho připraveného vzorku se do formy vloží takové množství vlhké směsi, aby po zhutnění vyplnilo více než jednu třetinu výšky tělesa formy. Směs uložená v Proctorově formě A je hutněna 25 údery pěstů na vrstvu. Směs v Proctorově formě B je hutněna 56 údery pěstů na vrstvu. Údery se rovnoměrně rozdělí po obvodu. Poslední zhutněná vrstva směsi nemá být více než 10 mm nad horním okrajem tělesa formy. Nástavec se sejme a odstraní se přebytečná směs a povrch zhutněné směsi se zarovná pravítkem s okrajem formy. Jakékoliv hrubé částice, které byly během zarovnání odstraněny, se nahradí jemnějšími částicemi ze vzorku, které se vtlačí dovnitř. Materiál se základní deskou se zváží s přesností na 1 g. Zhutněná směs se vyjme z formy a umístí se do nádoby ke stanovení vlhkosti. Zkouška zhutnitelnosti se provede s každým ze zbývajících připravených vzorků, čímž se získá nejméně 5 hodnot. Vlhkosti musí být takové, aby optimální vlhkost, při které se dosáhne maximální objemové hmotnosti suché směsi, ležela blízko středu rozmezí. [7]

#### **2.5.3.2 Proctorova zkouška pro směsi hutněné pěstem (C) v Proctorově formě (C)**

Pro velmi širokou Proctorovu formu se používá pěst o hmotnosti 15 kg, který dopadá z výšky 600 mm. Směs je hutněna 22 údery na každou vrstvu. Dále se pokračuje jako u Proctorovy zkoušky pro směsi hutněné pěstem o hmotnosti 2,5 kg (A) v Proctorově formě (A) a (B). [7]

**Tabulka 6: Přehled Proctorovy standardní zkoušky [7]**

Zkouška	Charakteristiky zkoušky	Rozměry	Symbol	Proctorova forma		
				A	B	C
Proctor Standard	Hmotnost pěchu	kg	$m_R$	2,5	2,5	15,0
	Průměr pěchu	mm	$d_2$	50,0	50,0	125,0
	Výška dopadu	mm	$h_2$	305	305	600
	Počet vrstev	-	-	3	3	3
	Počet úderů na vrstvu	-	-	25	56	22

**Tabulka 7: Rozměr ocelové podkladní desky [7]**

Proctorova forma	Průměr $d_3$ (mm)	Tloušťka $S_2$ (mm)
A	$d_{1-0,5}$	10,0±0,1
B		
C		20,0±0,1

## 2.6 Proctorova zkouška modifikovaná

### 2.6.1 Postup zkoušky

#### 3.6.1.1 Modifikovaná Proctorova zkouška pro směsi hutněné pěchem (B) v Proctorově formě (A) a (B)

Při této zkoušce se zhutňovací síla navyšuje na 4,5 kg. Pěch dopadá na směs z výšky 457 mm. Počet hutněných vrstev se navyšuje na 5. Směs uložená v Proctorově formě A je hutněna 25 údery na vrstvu a směs uložená v Proctorově formě B je hutněna 56 údery na vrstvu. Dále se postupuje podle stejného postupu jako u zkoušky Proctor standard. [7]

#### 2.6.1.2 Modifikovaná Proctorova zkouška pro směsi hutněné pěchem (C) v Proctorově formě (C)

Při použití velmi široké Proctorovy formy se zhutňovací síla navyšuje na 15 kg. Pěch dopadá na směs z výšky 600 mm. Počet úderů je zvýšen na 98 na jednu

vrstvu. Celkový počet hutněných vrstev je 3. Dále se postupuje podle stejného postupu jako u zkoušky Proctor Standard. [7]

**Tabulka 8: Přehled Proctorovy modifikované zkoušky [7]**

Zkouška	Charakteristiky zkoušky	Rozměry	Symbol	Proctorova forma		
				A	B	C
Proctor modifikovaný	Hmotnost pěchu	kg	$m_R$	4,5	4,5	15,0
	Průměr pěchu	mm	$d_2$	50	50	125
	Výška dopadu	mm	$h_2$	457	457	600
	Počet vrstev	-	-	5	5	3
	Počet úderů na vrstvu	-	-	25	56	98

### 2.6.2 Grafické vyjádření

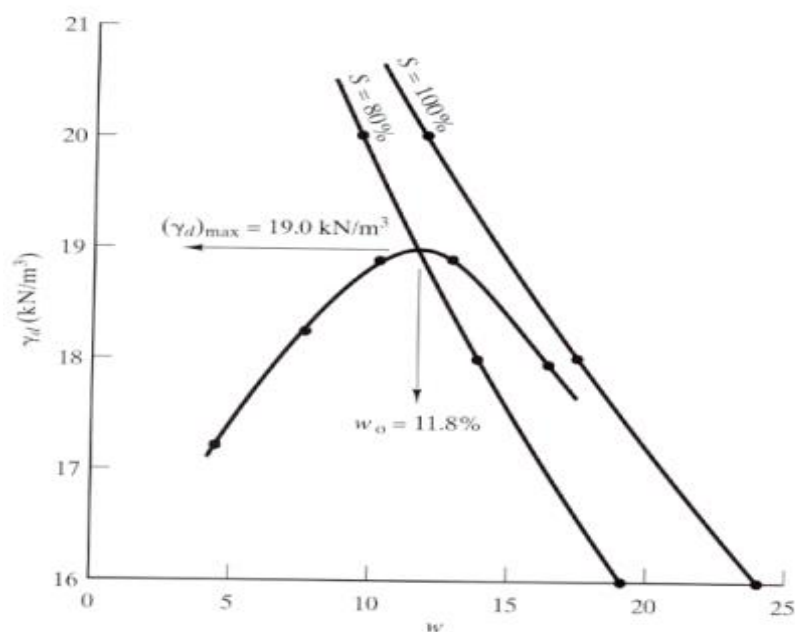
Hodnoty objemové hmotnosti suché směsi se vynesou na osu y a odpovídající vlhkosti na osu x. Vynesenými body se proloží křivka. Z vrcholu křivky se zjistí maximální objemová hmotnost suché směsi  $\rho_{dmax}$ , které náleží optimální vlhkost  $w_{opt}$ . Do stejného grafu se vynesou křivka odpovídající 0% mezerovitosti, která odpovídá hodnotě 100 % saturace směsi, vypočítaná podle rovnice 2. [7]

#### Rovnice 2: Výpočet saturace [7]

$$\rho_d = (1 - 0,01 \times V_a) / (\rho_s - 1 + 0,01 \times w \times \rho_w - 1) \quad (2)$$

kde  $\rho_d$  objemová hmotnost suché směsi v  $\text{kg/m}^3$   
 $\rho_s$  zdánlivá hustota pevných částic v  $\text{kg/m}^3$   
 $\rho_w$  objemová hmotnost vody v  $\text{kg/m}^3$   
 $V_a$  mezerovitost (0%)  
 $w$  vlhkost v %





Obrázek 5: Zhutňovací křivka [6]

## 2.7 Vibrační pěch

Metoda pro stanovení vztahu mezi suchou objemovou hmotností a vlhkostí směsi při zhutnění pomocí vibračního pěchu. Metoda je vhodná pro směsi, které neobsahují více než 30% hmotnosti materiálu zachyceného na zkušební síti s velikostí otvorů 20mm. Metoda není použitelná pro směsi s více než 10% hmotnosti směsi zachycené na zkušební síti s velikostí otvorů 40mm. Směs je hutněna v kovové válcové formě pomocí elektricky poháněného vibračního pěchu při různých vlhkostech. [8]

### 2.7.1 Zkušební zařízení

K této metodě je používána válcová forma z nerezavějící oceli s vnitřním průměrem  $152 \pm 0,5$  mm, vnitřní hloubkou  $127 \pm 1,0$  mm a tloušťkou stěn 5 mm. [8]

### **2.7.2 Další zařízení**

- Odnímatelná základní deska a odnímatelný nástavec
- Elektricky poháněný vibrační pěch
- Ocelová hutnicí deska
- Hloubkoměr nebo ocelové pravítko
- Váhy
- Zkušební síta s velikostí otvorů 40 mm a 20 mm
- Kovové nebo plastové misky
- Stopky nebo podobné zařízení
- Zařízení pro vyjmutí vzorku z formy

### **2.7.3 Příprava zkušebního vzorku**

Vzorek předaný do laboratoře musí mít hmotnost nejméně 40 kg.

Zrna zachycená na síti s velikostí otvorů 40 mm se oddělí od zbytku laboratorního vzorku. Použije se postup prosévání bez promytí a sušení vzorku. Zkušební vzorek se rozdělí na 5 nebo více dílčích vzorků. Každý vzorek má hmotnost přibližně 6 kg. Každý dílčí vzorek se navlhčí tak, aby vlhkost odpovídající maximální suché objemové hmotnosti ležela v tomto intervalu. Vhodné jsou přírůstky 1% až 2%. Pokud dílčí vzorek obsahuje více vody, než se vyžaduje pro zhutnění, nechá se dílčí vzorek vysušit na požadovanou vlhkost. [8]

### **2.7.4 Postup zkoušky**

Zváží se forma se základní deskou a připevněným nástavcem s přesností na 5 g. Změří se výška H formy s nástavcem s přesností na 0,5 mm. Sestava se umístí na pevnou podstavu. Vhodná je například betonová podlaha. Hutníme ve 3 vrstvách tak, že první navážku z některého dílčího zkušebního vzorku vložíme do formy tak, aby po zhutnění zabírala asi jednu třetinu výšky tělesa formy. Na tuto navážku se umístí hutnicí deska s vibračním pěchem po dobu  $60 \pm 2$  s. Během hutnění je třeba na pěch působit stálou silou, a to tak, aby celková svislá síla včetně hmotnosti pěchu byla od 300N do 400N. Na první navážku se do formy umístí druhá o podobném objemu a opakuje se postup hutnění. Přidá

se třetí navážka a provede se nové hutnění. Pravítko se položí napříč přes horní okraj nástavce a změří se vzdálenost od pravítka dolů k povrchu zhutněné poslední navážky s přesností 0,5 mm. Provede se odečet na čtyřech místech a vypočítá se střední výška  $h$  celkové navážky. Pokud je střední výška  $h$  menší než 127mm nebo větší než 133 mm, zhutněný zkušební vzorek se vyřadí a postup se opakuje se zbytkem dílčího vzorku, až se získá zhutněný vzorek s požadovanou výškou. Forma, zhutněná navážka a základní deska se zváží. Zhutněný dílčí vzorek se vyjme z formy a stanoví se jeho vlhkost. [8]

### 2.7.5 Grafické vyjádření

Hodnoty suché objemové hmotnosti se vynesou na ose  $y$  a odpovídající vlhkost na osu  $x$ . Vynesenými body se proloží křivka. Z vrcholu křivky se zjistí maximální objemová hmotnost suché směsi  $\rho_{dmax}$ , které náleží optimální vlhkost  $w_{opt}$ . Do stejného grafu se vynesou křivky odpovídající 0%, 5% a 10% mezerovitosti vypočítaná podle rovnice 3. [8]

**Rovnice 3: Výpočet saturace [8]**

$$\rho_d = (1 - V_a / 100) / (1 / \rho_s + w / 100\rho_w) \quad (3)$$

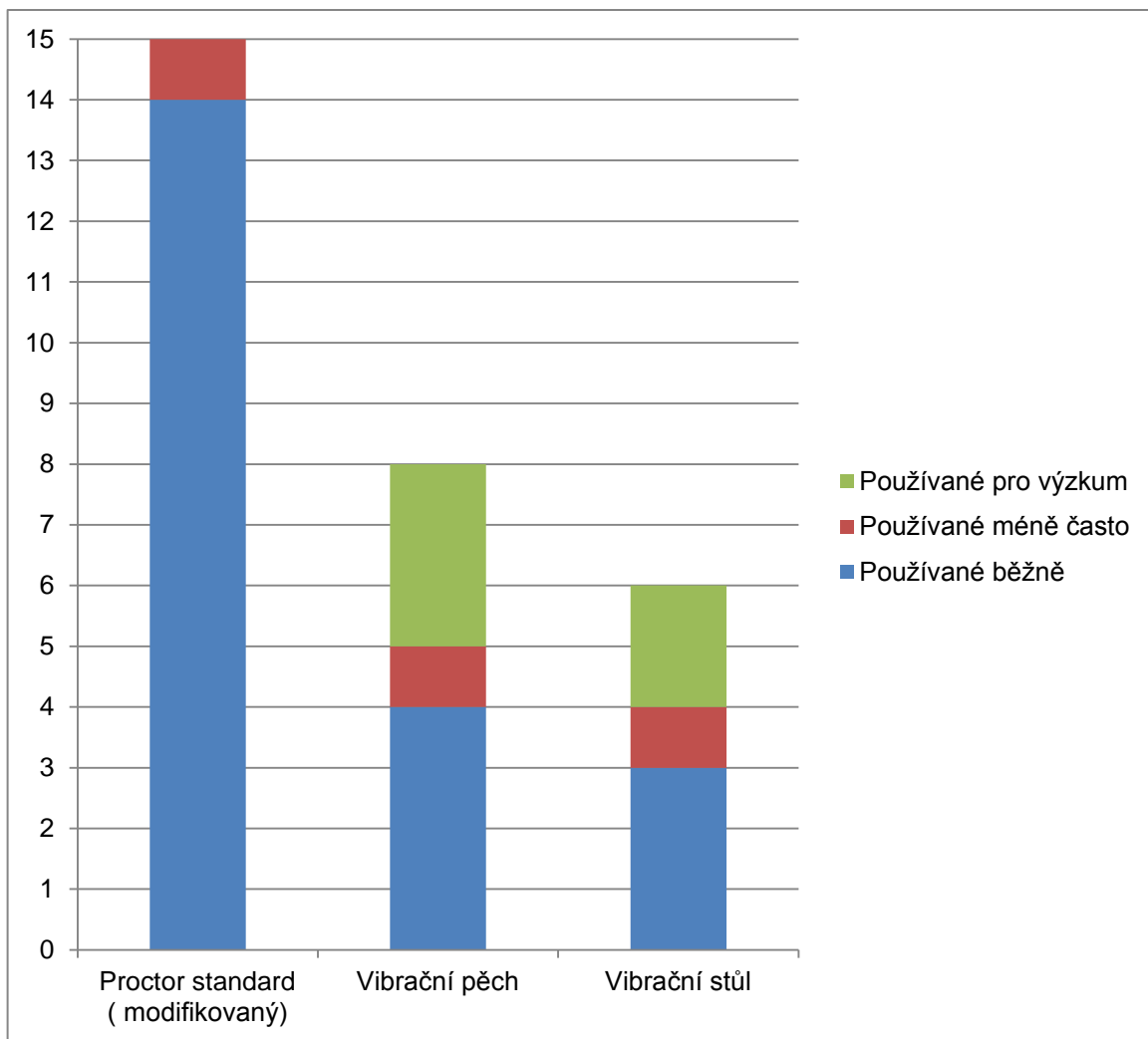
kde	$\rho_d$	suchá objemová hmotnost v $Mg/m^3$
	$\rho_s$	objemová hmotnost zrn, v $Mg/m^3$
	$V_a$	mezerovitost směsi (0%, 5%, 10%)
	$w$	vlhkost směsi v %

## 2.8 Metody stanovení zhutnitelnosti v Evropských zemích

- Metoda se běžně používá – A
- Metoda se používá méně často – B
- Metoda se používá pouze pro výzkum – C

Tabulka 9: Přehled používaných metod [9]

Země	Zhutňovací metoda		
	Proctor standard ( modifikovaný)	Vibrační pěch	Vibrační stůl
Dánsko	A	-	A
Finsko	A	-	-
Francie	A	-	-
Německo	A	A	A
Řecko	A	-	-
Island	A	-	-
Irsko	B	A	-
Nizozemí	A	B	-
Norsko	A	C	C
Potrugalsko	A	C	C
Slovinsko	A	C	-
Švýcarsko	A	A	-
Španělsko	A	-	B
Švédsko	A	-	A
Velká Británie	A	A	-



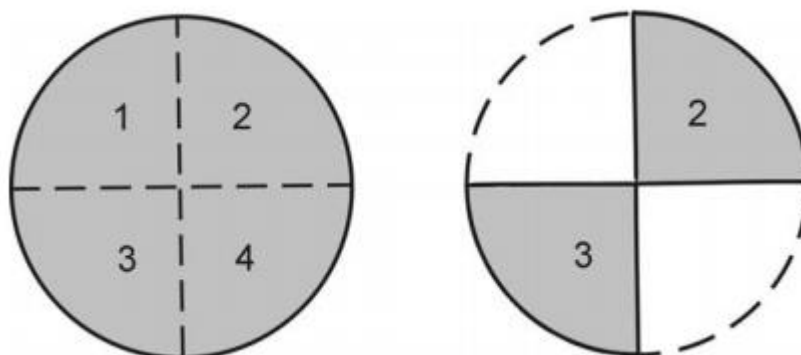
**Graf 1: Přehled využití zahraničních metod stanovení zhutnitelnosti [9]**

### 3 Praktická část

Po dohodě s vedoucím práce došlo k úpravě zadání ve smyslu zkoušení jednoho typu zeminy, zato třemi zkouškami zhutnitelnosti. Na základě této změny jsem zkoušel únosnost na zkušebních tělesech vytvořených různou hutnicí energií. V praktické části bakalářské práce se tedy věnuji laboratornímu zkoušení zhutnitelnosti vybrané jemnozrné zeminy. Vyhodnocuji a porovnávám výsledky jednotlivých zkoušek. Zkoušky jsem prováděl v laboratoři, Ústavu pozemních komunikací, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně. Protokoly o provedených zkouškách jsou uvedeny v příloze této bakalářské práce.

#### 3.1 Příprava vzorku

Jedná se o jemnozrnou zeminu klasifikovanou jako jíl s nízkou plasticitou, F6CL. Materiál mi poskytla laboratoř, Ústavu pozemních komunikací, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně. Materiál se nacházel ve vysušeném stavu. Nejdříve jsem zeminu homogenizoval. To znamená, že jsem zeminu přeházal z jedné hromady na druhou a zpět, aby se dosáhlo stejnorodé směsi. Z homogenizované zeminy jsem laboratorní vzorek získal kvartací – zeminu jsem rozhrnul na čtyři části, dvě protilehlé jsem smíchal a uskladnil k laboratornímu zkoušení.



Obrázek 6: Kvartace[10]

Ke stanovení zhutnitelnosti jsem homogenizovaný vzorek rozdělil na 5 dílčích vzorků po 2,5kg. Optimální vlhkost laboratorního vzorku se očekává mezi 12% - 15%. Vzorky jsem proto navlhčil tak, aby polovina vzorků měla nižší vlhkost a polovina vyšší vlhkost než je očekávaná optimální vlhkost. Rozdíl vlhkosti sousedních vzorků je 2%. Každý vzorek jsem dostatečně promíchal a následně uložil do vzduchotěsného obalu a uskladnil minimálně na 12 hodin, aby došlo k rovnoměrnému rozložení vlhkosti. Pokud není dodržena doba uskladnění 12 hodin, dochází k nerovnoměrnému rozložení vlhkosti, což má za následek nežádoucí rozptyl hodnot zkoušky, který může ovlivnit získané výsledky.



**Obrázek 7: Suchá zemina[16]**



**Obrázek 8: Navlhčená zemina[16]**

### 3.2 Proctor standard

Zkoušku Proctor standard jsem provedl dle ČSN EN 13286 – 2. Do sestavené formy o průměru 100 mm, výšce 120 mm a hmotnosti 6519 g, jsem ukládal zeminu ve třech vrstvách. Každá vrstva byla hutněna 25 úderů z výšky 305 mm. Po zhutnění třetí vrstvy jsem z formy odebral nástavec, materiál jsem zarovnal s horní hranou formy a zvážil. Po zvážení jsem odebral zhutněný materiál z formy. Přibližně ze středu materiálu jsem odebral reprezentativní vzorek, který jsem dal do předem zvážené váženky. Zaznamenal jsem hmotnost váženky s vlhkým vzorkem. Poté jsem vzorek s váženkou vložil do sušárny, kde se vzorek vysušil na ustálenou hmotnost. Zaznamenal jsem hmotnost vysušeného vzorku s váženkou a následně vypočítal vlhkost a objemovou hmotnost suché zeminy. Tento postup jsem opakoval se zbytkem různě navlhčených vzorků. Hodnoty jsem zaznamenal a vynesl do grafu, ze kterého jsem odečetl optimální vlhkost a maximální objemovou hmotnost suché zeminy. Zaznamenané a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10 a výsledné hodnoty vynesené v grafu 2.



Obrázek 10: Proctorův hutnicí přístroj[16]



Obrázek 9: Princip Proctor standard[11]



### 3.2.1 Výsledky zkoušky Proctor standard

Tabulka 10: Vypočítané hodnoty - Proctor standard[16]

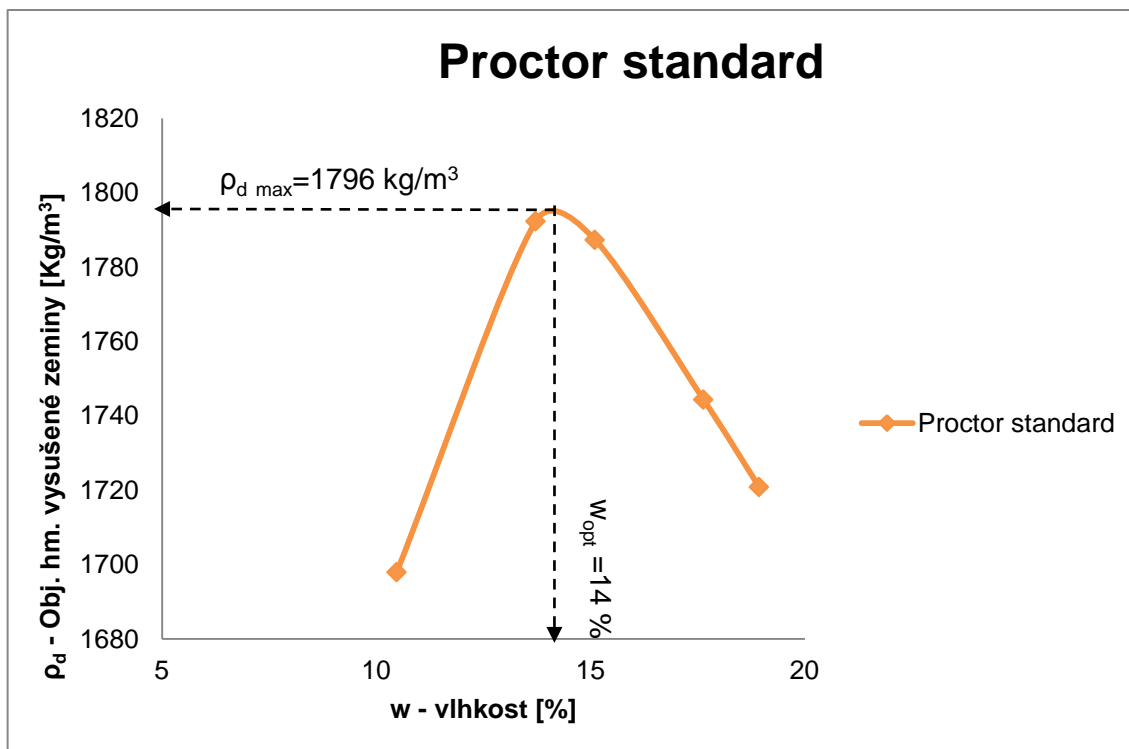
Zkouška Proctor standard		1	2	3	4	5
Hmotnost moždíře	g	6519,0	6519,0	6519,0	6519,0	6519,0
Hmo. moždíře+vlhká zemina	g	8287,0	8440,0	8458,0	8453,0	8448,0
Obj. hmotnost vlhké zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	1875,9	2038,2	2057,3	2052,0	2046,7
Hmotnost váženky	g	29,3	29,0	29,1	29,9	29,0
Hmo. váženky+vlhká zemina	g	182,2	178,2	185,3	204,0	181,0
Hmo. váženky+suchá zemina	g	167,7	160,2	164,8	177,9	156,8
Vlhkost zeminy	%	10,5	13,7	15,1	17,6	18,9
Obj. hmotnost suché zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	1698,0	1792,3	1787,3	1744,4	1720,9



Obrázek 11: Zhutněný vzorek[16]



Obrázek 12: Reprezentativní vzorek pro stanovení vlhkosti[16]



Graf 2: Výsledek zkoušky Proctor standard[16]

$$w_{\text{opt}} = 14\%$$

$$\rho_{d \text{ max}} = 1790 \text{ kg/m}^3$$

$w_{\text{opt}}$  je optimální vlhkost (%)

$\rho_{d \text{ max}}$  maximální objemová hmotnost suché zeminy ( $\text{kg/m}^3$ )

### 3.3 Proctor modifikovaný

Zkoušku Proctor modifikovaný jsem provedl dle ČSN EN 13286 – 2. Do sestavené formy o průměru 100 mm, výšce 120 mm a hmotnosti 6519 g, jsem ukládal zeminu v pěti vrstvách. Každá vrstva byla hutněna 25 údery z výšky 457 mm. Po zhutnění poslední vrstvy jsem z formy odebral nástavec, materiál jsem zarovnal s horní hranou formy a zvážil. Dále jsem postupoval stejně jako u metody Proctor standard. Zaznamenané a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11 a výsledné hodnoty vyneseny v grafu 3.



Obrázek 14: Princip Proctor modifikovaný [11]

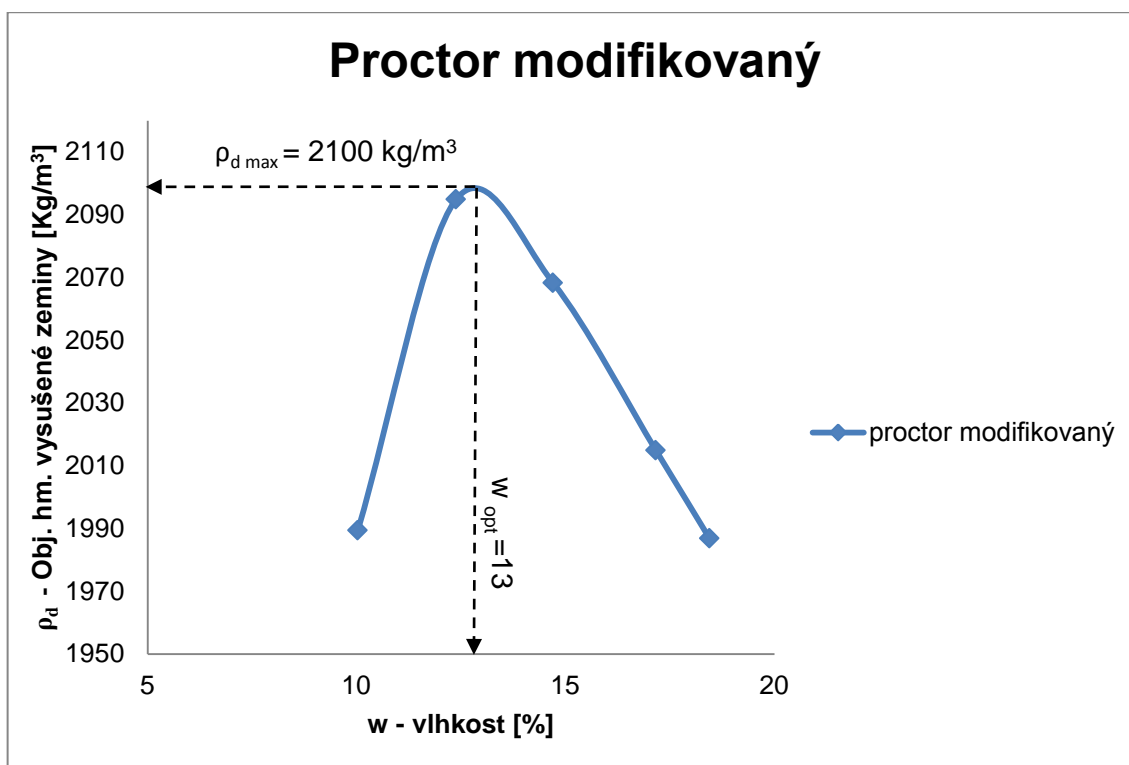


Obrázek 13: Horkovzdušná sušárna[16]

### 3.3.1 Výsledky zkoušky Proctor modifikovaný

Tabulka 11: Vypočítané hodnoty - Proctor modifikovaný[16]

Zkouška Proctor modifikovaný		1	2	3	4	5
Hmotnost moždíře	g	6519,0	6519,0	6519,0	6519,0	6519,0
Hmo. moždíře+vlhká zemina	g	8582,0	8738,0	8755,0	8744,0	8737,0
Obj. hmotnost vlhké zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	2188,9	2354,4	2372,5	2360,8	2353,4
Hmotnost váženky	g	97,5	28,5	28,5	30,2	28,2
Hmo. váženky+vlhká zemina	g	251,1	125,6	126,0	148,3	145,7
Hmo. váženky+suchá zemina	g	237,1	114,9	113,5	131,0	127,4
Vlhkost zeminy	%	10,0	12,4	14,7	17,2	18,4
Obj. hmotnost suché zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	1989,4	2095,0	2068,3	2015,0	1986,8



Graf 3: Výsledek zkoušky Proctor modifikovaný[16]

**$w_{\text{opt}} = 13\%$**

**$\rho_{d \max} = 2100 \text{ kg/m}^3$**

$w_{\text{opt}}$  je optimální vlhkost (%)

$\rho_{d \max}$  maximální objemová hmotnost suché zeminy ( $\text{kg/m}^3$ )

### 3.4 Vibrační pěch

Zkoušku vibrační pěch jsem provedl dle ČSN EN 13286 – 4. Do sestavené formy průměru 100 mm, výšky 100 mm a hmotnosti 5444 g jsem ukládal zeminu ve třech vrstvách. Každá vrstva byla přitížena 300 – 400 KN po dobu 1 minuty. Po zhutnění třetí vrstvy jsem z formy odebral nástavec, materiál jsem zarovnal s horní hranou formy a zvážil. Po zvážení následovalo vytlačení zhutněného materiálu z formy pomocí lisu. Přibližně ze středu materiálu jsem

odebral reprezentativní vzorek, který jsem dal do předem zvážené váženky. Zaznamenal jsem hmotnost váženky s vlhkým vzorkem. Poté jsem vzorek s váženkou vložil do sušárny, kde se vzorek vysušil na ustálenou hmotnost. Zaznamenal jsem hmotnost vysušeného vzorku s váženkou a následně vypočítal vlhkost a objemovou hmotnost suché zeminy. Tento postup jsem opakoval se zbytkem různě navlhčených vzorků. Hodnoty jsem zaznamenal a vynesl do grafu, ze kterého jsem odečetl optimální vlhkost a maximální objemovou hmotnost suché zeminy. Zaznamenané a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 12 a výsledné hodnoty jsou vyneseny v grafu 4.

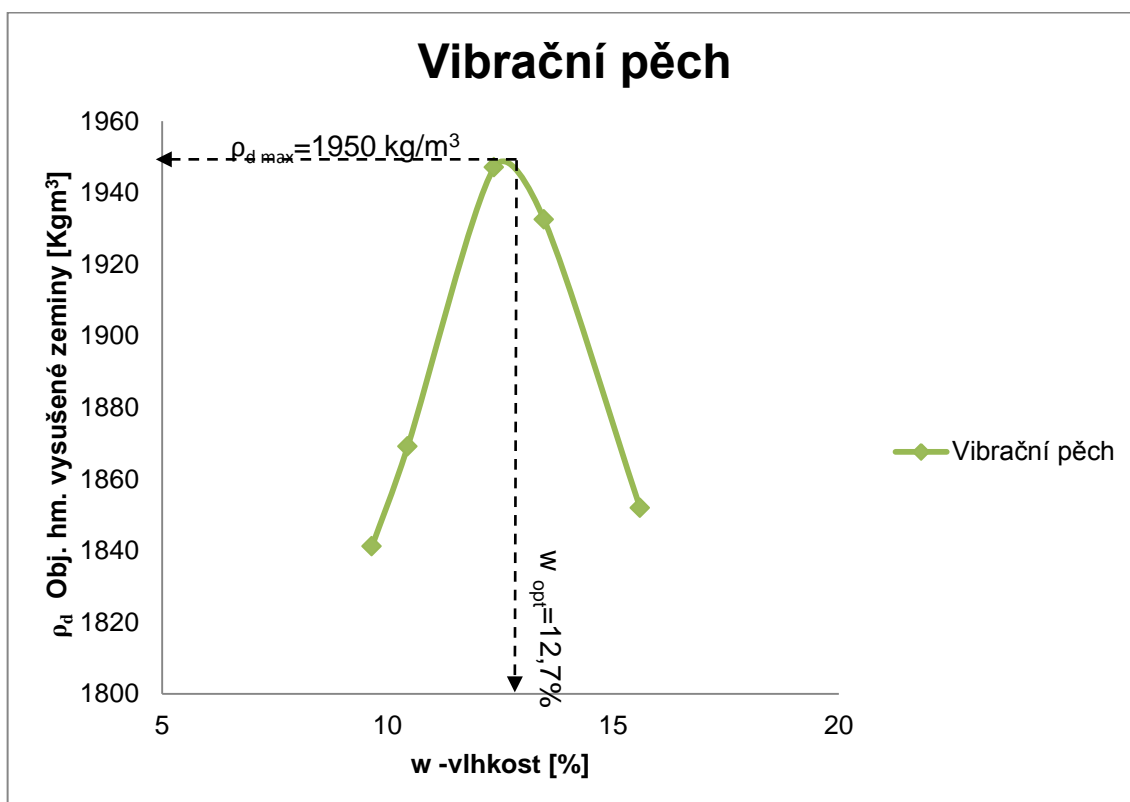
#### 3.4.1 Výsledky zkoušky Vibrační pěch

Tabulka 12: Vypočítané hodnoty - vibrační pěch[16]

Zkouška vibrační pěch		1	2	3	4	5
Hmotnost moždíře	g	5444,0	5444,0	5444,0	5444,0	5444,0
Hmo. moždíře+vlhká zemina	g	7014,7	7050,0	7146,0	7149,9	7109,5
Obj. hmotnost vlhké zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	2018,9	2064,3	2187,7	2192,7	2140,7
Hmotnost váženky	g	18,7	17,1	29,3	17,7	18,6
Hmo. váženky+vlhká zemina	g	118,7	125,0	156,6	145,8	108,3
Hmo. váženky+suchá zemina	g	109,9	114,8	142,6	130,6	96,2
Vlhkost zeminy	%	9,6	10,4	12,4	13,5	15,6
Obj. hmotnost suché zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	1841,2	1869,1	1947,1	1932,5	1852,0



Obrázek 15: Zařízení ke zkoušce vibrační pěch



Graf 4: Výsledek zkoušky vibrační pěch[16]



$$w_{\text{opt}} = 12,7\%$$

$$\rho_{d \text{ max}} = 1950 \text{ kg/m}^3$$

$w_{\text{opt}}$  je optimální vlhkost (%)

$\rho_{d \text{ max}}$  maximální objemová hmotnost suché zeminy ( $\text{kg/m}^3$ )



Obrázek 16: Lis k vytlačení vzorku[16]



Obrázek 17: Zhutněný a vytlačený vzorek[16]

### 3.5 Vyhodnocení zkoušky

**Rovnice 4: Objemová hmotnost vlhké směsi [7]**

$$\rho = (m_2 - m_1) \times 1000 / V \quad (4)$$

kde	$V$	je	objem moždíře ( $\text{cm}^3$ )
	$\rho$		objemová hmotnost zhutněné vlhké směsi ( $\text{kg/m}^3$ )
	$m_1$		hmotnost moždíře a základní desky (g)
	$m_2$		hmotnost moždíře, základní desky a zhutněné směsi (g)

**Rovnice 5: Vlhkost vzorku  $w$  [12]**

$$w = (m_2 - m_3) / (m_3 - m_1) \quad (5)$$

kde	$m_1$	je	hmotnost váženky (g)
	$m_2$		hmotnost váženky s vlhkým vzorkem (g)
	$m_3$		hmotnost váženky s vysušeným vzorkem (g)

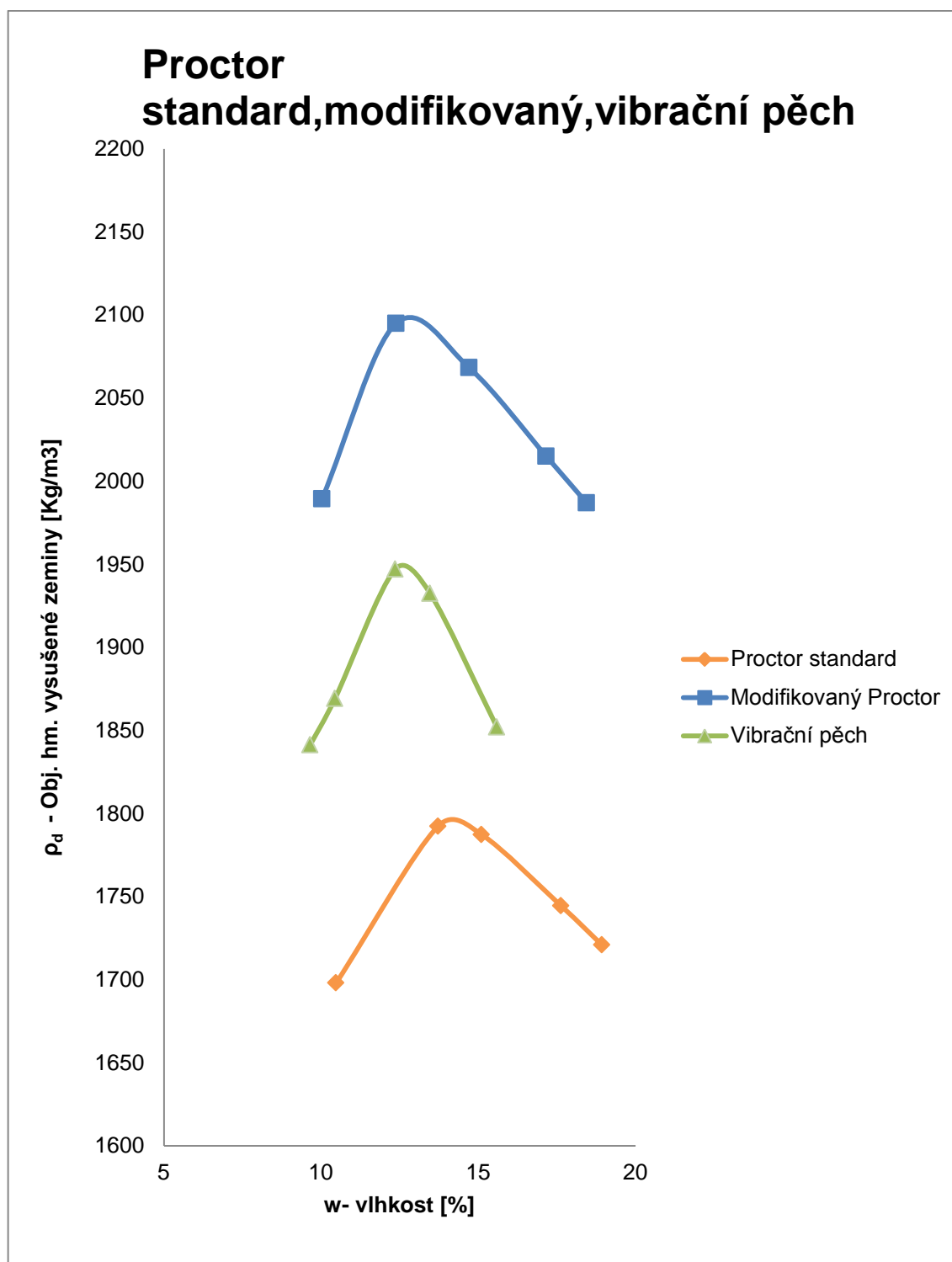
**Rovnice 6: Objemová hmotnost zhutněné suché směsi [7]**

$$\rho_d = (100 \times \rho) / (100 + w) \quad (6)$$

kde	$\rho_d$	je	objemová hmotnost zhutněné suché směsi ( $\text{kg/m}^3$ )
	$\rho$		objemová hmotnost zhutněné vlhké směsi ( $\text{kg/m}^3$ )
	$w$		vlhkost směsi (%)



### 3.6 Porovnání laboratorních zkoušek



Graf 5: Porovnání laboratorních zkoušek[16]

### 3.7 Zkušební metoda pro stanovení CBR a IBI

#### 3.7.1 Účel zkoušky

„Kalifornský poměr únosnosti CBR (California Bearing Ratio) byl vyvinut před 2. světovou válkou v Kalifornii. Zkouška byla určena pro měření únosnosti zemin v podloží vozovek při výstavbě silnic. V dnešní době CBR slouží jako průkazní a kontrolní zkoušky při vyhodnocení únosnosti podloží a konstrukčních vrstev silničních komunikací.“ [13]

CBR je číslo v %. Srovnává pevnost zkoušené zeminy s pevností vztaženého drceného materiálu. Zkouška se provádí tak, že ocelový trn o průměru 50 mm se zatlačuje do povrchu zhutněné zeminy. Rychlost penetrace ocelového trnu je 1,27 mm/min. „Hodnota CBR je pak poměr síly, kterou je nutno vyvinout k zatlačení trnu do výše uvedené hloubky k známé síle potřebné k zatlačení trnu do vztažného materiálu.“ [13] [2]

CBR lze stanovit dle vztahu:

**Rovnice 7: Výpočet CBR [13]**

$$CBR = \frac{F}{F_s} \times 100 \quad [\%] \quad (7)$$

F síla, potřebná k zatlačení trnu do stanovené hloubky ve zkoušené zemině v kN

F<sub>s</sub> standardní síla, potřebná k zatlačení trnu do stanovené hloubky v normovém kamenivu v kN.

**Tabulka 13: Hodnoty standardních zkoušky CBR [14]**

Penetrace (mm)	Standardní síla (kN)
2,5	13,5
5	20

Okamžitá hodnota poměru únosnosti IBI (Immediate Bering index) je variantou CBR. Zjišťuje se krátce po úpravě zeminy například hutněním a nepoužívají se zatěžovací prstence. [13]

### 3.8 Zkouška CBR a IBI

Hodnoty okamžitého indexu únosnosti (IBI) a kalifornského poměru únosnosti (CBR) jsem provedl dle ČSN EN 13286 – 47. Připravil jsem si 3 vzorky, každý vzorek o hmotnosti 6 kg. Každý vzorek jsem navlhčil na optimální vlhkost  $w_{opt}$  podle předešlých laboratorních metod. První vzorek jsem přivlhčil na 14% na základě výsledku získaného pomocí metody Proctor standard. Druhý vzorek jsem přivlhčil na 13% podle metody Proctor modifikovaný a třetí vzorek podle metody vibrační pěch na 12,6%. Každý vzorek jsem zhutnil do Proctorovy formy (B) původní metodou. To znamená, že první vzorek jsem zhutnil podle Proctor standard dle ČSN EN 13286 - 2 . Hutnil jsem 56 úderů na jednu vrstvu o hmotnosti pěchu 2,5 kg z výšky 305 mm. Celkově jsem hutnil 3 vrstvy. Druhý vzorek jsem hutnil podle metody Proctor modifikovaný dle ČSN EN 13286 – 2. Vzorek jsem hutnil 56 úderů na vrstvu o hmotnosti pěchu 4,5 kg z výšky dopadu 457 mm. Celkově jsem hutnil 5 vrstev. Třetí vzorek jsem hutnil podle metody vibrační pěch, dle ČSN EN 13286 – 4. Hutnil jsem 3 vrstvy s přitížením 300 – 400 kN na vrstvu podobu jedné minuty. Následně jsem na každém vzorku stanovil okamžitý poměr únosnosti (IBI). Vzorek i s formou jsem položil do lisu InfraTest ve firmě CONSULTTEST s.r.o. Válcový penetrační trn o průměru 50 mm, rychlostí penetrace 1,27 mm se začal zatlačovat do vzorku a zaznamenávaly se hodnoty sil při penetracích s krokem po 0,5 mm. Po skončení zkoušky IBI jsem vzorek obrátil a vložil i s formou do nádoby s vodou, vzorek jsem přitížil a nechal saturovat po dobu 4 dnů.



**Obrázek 18: Vzorky uloženy k saturaci[16]**

Zkouška kalifornský poměr únosnosti (CBR) probíhá obdobně jako zkouška IBI. Po saturaci jsem vzorky vyndal z vody a nechal okapat. Vzorek jsem vložil do lisu a přitížil zatěžovacími prstenci.



**Obrázek 19: Zkouška IBI[16]**



**Obrázek 20: Zkouška CBR[16]**

### 3.8.1 Vyhodnocení zkoušky

Hodnoty sil v závislosti na penetraci jsem vynesl do grafu, a to tak, že na osu y jsem vynesl síly a příslušnou penetraci jsem vynesl na osu x a těmito body jsem proložil křivku. Křivkám jsem provedl korekci předepsanou postupem v normě ČSN EN 13286 – 47. Ze zkušební křivky jsem odečetl síly odpovídající penetraci 2,5 a 5 mm. Hodnoty jsem vypočítal podle rovnice 7. Síla  $F_{\text{STANDARD}}$  je u penetrace 2,5 mm 13,5 kN, u penetrace 5 mm 20 kN. Vyšší procento je hodnotou CBR/IBI.

Tabulka 14: Zaznamenané hodnoty IBI[16]

Penetrace (mm)	Síla (kN) IBI - PM	Síla (kN) IBI - PS	Síla (kN) IBI - VP
0,0	0,00	0,00	0,00
0,5	0,00	0,00	0,17
1,0	0,00	0,00	0,75
1,5	1,12	0,89	1,07
2,0	1,51	1,49	1,30
2,5	1,90	1,95	1,47
3,0	2,24	2,38	1,61
3,5	2,57	2,72	1,75
4,0	2,81	2,98	1,89
4,5	2,00	3,20	2,02
5,0	2,40	3,40	2,16
5,5	2,64	3,54	2,28
6,0	3,21	3,71	2,42
6,5	3,40	3,84	2,55
7,0	3,58	3,98	2,68

### Výsledek zkoušky IBI – hutněný podle Proctor modifikovaný

Tabulka 15: Vyhodnocení zkoušky IBI – (PM)[16]

Penetrace po korekci (mm)	Síla (kN)	Standardní síla (kN)	IBI (%)
2,5	1,9	13,2	14,4
5,0	3,34	20,0	16,7

### Výsledek zkoušky IBI – hutněný podle Proctor standard

Tabulka 16: Vyhodnocení zkoušky IBI – (PS)[16]

Penetrace po korekci (mm)	Síla (kN)	Standardní síla (kN)	IBI (%)
3,3	2,60	13,2	19,7
5,8	3,65	20,0	18,3

### Výsledek zkoušky IBI – hutněný podle vibračního pěchu

Tabulka 17: Vyhodnocení zkoušky IBI – (VP)[16]

Penetrace po korekci (mm)	Síla (kN)	Standardní síla (kN)	IBI (%)
2,9	1,60	13,2	12,1
5,4	2,26	20,0	11,3

**Tabulka 18: Zaznamenané hodnoty CBR[16]**

Penetrace(mm)	Síla (kN)CBR - PM	Síla (kN) CBR - PS	Síla (kN) CBR - VP
0,0	0	0	0
0,5	0,14	0,12	0,16
1,0	0,2	0,15	0,24
1,5	0,28	0,17	0,30
2,0	0,38	0,21	0,33
2,5	0,44	0,22	0,36
3,0	0,49	0,23	0,39
3,5	0,54	0,26	0,41
4,0	0,59	0,28	0,43
4,5	0,63	0,3	0,45
5,0	0,68	0,32	0,47
5,5	0,72	0,33	0,48
6,0	0,76	0,35	0,49
6,5	0,8	0,37	0,51
7,0	0,84	0,39	0,53

**Výsledek zkoušky CBR - hutněný podle Proctor modifikovaný**

**Tabulka 19: Výsledek zkoušky CBR – (PM)[16]**

Penetrace (mm)	Síla (kN)	Standardní síla (kN)	CBR (%)
2,5	0,44	13,2	3,3
5,0	0,68	20,0	3,4

## Výsledek zkoušky CBR – hutněný podle Proctor standard

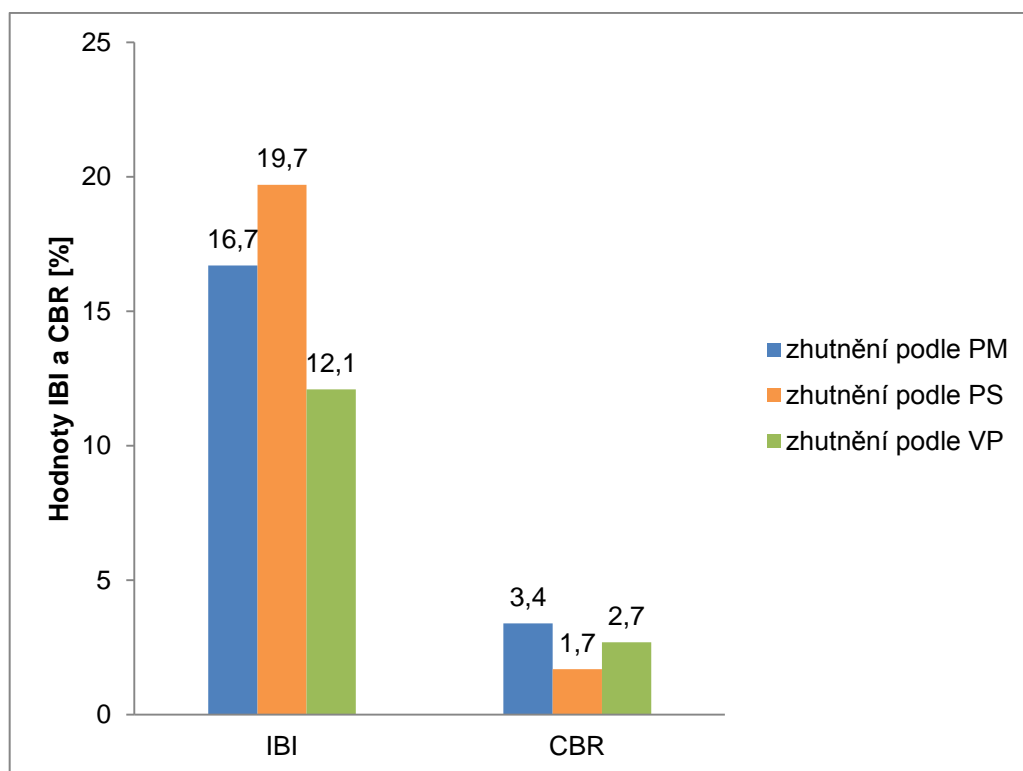
Tabulka 20: Výsledek zkoušky CBR – (PS)[16]

Penetrace (mm)	Síla (kN)	Standardní síla (kN)	CBR (%)
2,5	0,22	13,2	1,7
5,0	0,32	20,0	1,6

## Výsledek zkoušky CBR – hutněný podle vibrační pěch

Tabulka 21: Výsledek zkoušky CBR – (VP)[16]

Penetrace (mm)	Síla (kN)	Standardní síla (kN)	CBR (%)
2,5	0,36	13,2	2,7
5,0	0,47	20,0	2,4



Graf 6: Vyhodnocení zkoušky IBI a CBR[16]



## 4 Závěr

Dle předpokladu z hlediska zhutnitelnosti zkoušené na jemnozrnné zemině F6CL vychází nejlépe ze zkoušky okamžitého indexu únosnosti (IBI) nejčastěji používaná metoda Proctorovy standardní zkoušky podle ČSN EN 13286 – 2. Výsledná hodnota je 19,7 %. Při ponoření zhutněného vzorku do vody na 96 hodin a následném zkoušení Kalifornského poměru únosnosti (CBR) je naopak důležité větší zhutnění Proctorovou zkouškou modifikovanou podle ČSN EN 13286 - 2, která vyšla 3,4%. Vibrační metody reprezentované zkouškou vibračního pěchu nejsou pro jemnozrnné zeminy vhodné. Výsledky zkoušek jsou znázorněny v grafu 6. Ze zkoušky CBR lze vyvodit, že jemnozrnná zemina F6CL není vhodná do aktivní zóny pozemní komunikace. Minimální hodnota CBR je 15%. Pokud zeminu chceme využít, je nutné ji upravit.

## 5 Seznam použitých zdrojů

- [1] FLAT, Zdenko, Jozef HLADKÝ a Juraj KELEŠI. *Dopravní stavby I: pro 3. ročník SPŠ stavebních*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1988, 314 s.
- [2] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II: Modul 1, [BM02-M01]*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005, 31 s.
- [3] ČSN EN ISO 14688 – 1 *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zatřídování zemin - Část 1: Pojmenování a popis*. Český normalizační institut, 2003.
- [4] KUDRNA, Jan. *Zemní práce: Realizace staveb pozemních komunikací* [online]. 2011 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: [http://www.vzdelavanimkekvalite.cz/PDFs/Zemni\\_prace.pdf](http://www.vzdelavanimkekvalite.cz/PDFs/Zemni_prace.pdf)
- [5] STEHLÍK, Dušan. *Zkoušení zemin a materiálů v podloží pozemní komunikace – zhutnitelnost a únosnost*. (přednáška) BRNO : VUT v Brně: Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, 2013.
- [6] LANBO LIU, Lanbo. *CE 240 Soil Mechanics & Foundations: Soil Compaction* [online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.engr.uconn.edu/~lanbo/CE240LectW033Compaction.pdf>
- [7] ČSN EN 13286 – 2. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Proctorova zkouška*. Český normalizační institut, 2005.
- [8] ČSN EN 13286 – 4. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 4: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Vibrační pěch*. Český normalizační institut, 2004.
- [9] BARTOŠ, Jaroslav. *Zhutňovací metody podle pr EN 13286 2 až 5 pro nestmelené a hydraulicky stmelené materiály*. Brno, 2004. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
- [10] POLNÍČEK, Zdeněk. *Laboratorní metody výzkumu* [online]. 2005 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: [http://www.geology.upol.cz/Soubory/2005\\_Dolnicek\\_Zdenek\\_Metody\\_laboratorniho\\_vyzkumu.pdf](http://www.geology.upol.cz/Soubory/2005_Dolnicek_Zdenek_Metody_laboratorniho_vyzkumu.pdf)

- [11] STEHLÍK, Dušan. *Praktické aplikace v pozemních komunikacích*; Skriptum k přednáškám. 2006. vyd. VUT v Brně: Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací
- [12] WEIGLOVÁ, Kamila. *Mechanika zemin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 186 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-7204-507-5.
- [13] MOHYLA, Jan. *Silniční a geotechnická laboratoř: Kalifornský poměr únosnosti* [online]. In: . [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/kalifornsky-pomer-unosnosti.pdf>
- [14] ČSN EN 13286 – 47. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání*. Český normalizační institut, 2005.
- [15] ŠEVC, Jan. *Směsný recyklát v podloží vozovek*. Brno, 2014. 70 s., 7 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
- [16] GRMELA, Jan. Vlastní pořízené fotografie, vlastní vytvořené tabulky, a grafy

## 6 Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení podle velikosti zrn [3] .....	12
Tabulka 2: Použitelnost zemin pro stavbu tělesa [4] .....	13
Tabulka 3: Rozměry forem [7] .....	18
Tabulka 4: Požadavky na pěchy [7] .....	18
Tabulka 5: Příprava vzorku [7] .....	20
Tabulka 6: Přehled Proctorovy standardní zkoušky [7] .....	23
Tabulka 7: Rozměr ocelové podkladní desky [7] .....	23
Tabulka 8: Přehled Proctorovy modifikované zkoušky [7] .....	24
Tabulka 9: Přehled používaných metod [9] .....	28
Tabulka 10: Vypočítané hodnoty - Proctor standard[16] .....	33
Tabulka 11: Vypočítané hodnoty - Proctor modifikovaný[16] .....	35
Tabulka 12: Vypočítané hodnoty - vibrační pých[16] .....	37
Tabulka 13: Hodnoty standardních zkoušky CBR [14] .....	42
Tabulka 14: Zaznamenané hodnoty IBI[16] .....	45
Tabulka 15: Vyhodnocení zkoušky IBI – (PM)[16] .....	46
Tabulka 16: Vyhodnocení zkoušky IBI – (PS)[16] .....	46
Tabulka 17: Vyhodnocení zkoušky IBI – (VP)[16] .....	46
Tabulka 18: Zaznamenané hodnoty CBR[16] .....	47
Tabulka 19: Výsledek zkoušky CBR – (PM)[16] .....	47
Tabulka 20: Výsledek zkoušky CBR – (PS)[16] .....	48
Tabulka 21: Výsledek zkoušky CBR – (VP)[16] .....	48

## 7 Seznam obrázků

Obrázek 1: Příčný řez pozemní komunikací [15] .....	13
Obrázek 2: Nezhuťněná a zhuťněná zemina [5] .....	15
Obrázek 3: Účinek hutnící energie [6] .....	17
Obrázek 4: Proctorova forma [7] .....	19
Obrázek 5: Zhutňovací křivka [6] .....	25
Obrázek 6: Kvartace [10] .....	30
Obrázek 7: Suchá zemina [16] .....	31
Obrázek 8: Navlhčená zemina [16] .....	31
Obrázek 9: Princip Proctor standard [11] .....	32
Obrázek 10: Proctorův hutnící přístroj [16] .....	32
Obrázek 11: Zhutněný vzorek [16] .....	33
Obrázek 12: Reprezentativní vzorek pro stanovení vlhkosti [16] .....	33
Obrázek 13: Horkovzdušná sušárna [16] .....	35
Obrázek 14: Princip Proctor modifikovaný [11] .....	35
Obrázek 15: Zařízení ke zkoušce vibrační pěch .....	38
Obrázek 16: Lis k vytlačení vzorku [16] .....	39
Obrázek 17: Zhutněný a vytlačенý vzorek [16] .....	39
Obrázek 18: Vzorky uloženy k saturaci [16] .....	44
Obrázek 19: Zkouška IBI [16] .....	44
Obrázek 20: Zkouška CBR [16] .....	44

## 8 Seznam grafů

Graf 1: Přehled využití zahraničních metod stanovení zhutnitelnosti [9] .....	29
Graf 2: Výsledek zkoušky Proctor standard[16] .....	34
Graf 3: Výsledek zkoušky Proctor modifikovaný[16] .....	36
Graf 4: Výsledek zkoušky vibrační pěch[16].....	38
Graf 5: Porovnání laboratorních zkoušek[16].....	41
Graf 6: Vyhodnocení zkoušky IBI a CBR[16].....	48

## 9 Seznam rovnic

Rovnice 1: Hutnící energie [5] .....	16
Rovnice 2: Výpočet saturace [7].....	24
Rovnice 3: Výpočet saturace [8].....	27
Rovnice 4: Objemová hmotnost vlhké směsi [7].....	40
Rovnice 5: Vlhkost vzorku w [12] .....	40
Rovnice 6: Objemová hmotnost zhutněné suché směsi [7].....	40
Rovnice 7: Výpočet CBR [13].....	42

## 10 Seznam příloh

Příloha A: Stanovení zhutnitelnosti podle Proctor standard .....	56
Příloha B: Stanovení zhutnitelnosti podle Proctor modifikovaný .....	57
Příloha C: Zhutnitelnost podle vibračního pěchu.....	58
Příloha D: Výsledek měření okamžitého indexu únosnosti IBI .....	59
Příloha E: Výsledek měření okamžitého indexu únosnosti IBI .....	60
Příloha F: Výsledek měření okamžitého indexu únosnosti IBI .....	61
Příloha G: Výsledek měření Kalifornského poměru únosnosti CBR.....	62
Příloha H: Výsledek měření Kalifornského poměru únosnosti CBR .....	63
Příloha I: Výsledek měření Kalifornského poměru únosnosti CBR.....	64

**Příloha A: Stanovení zhutnitelnosti podle Proctor standard**  
ČSN EN 13286-2

Objem moždíře	942cm <sup>3</sup>
Výška dopadu	305mm
Počet vrstev	3
Počet úderů na vrstvu	25

**Provedl:** Jan Grmela

**Vzorek:** F6CL

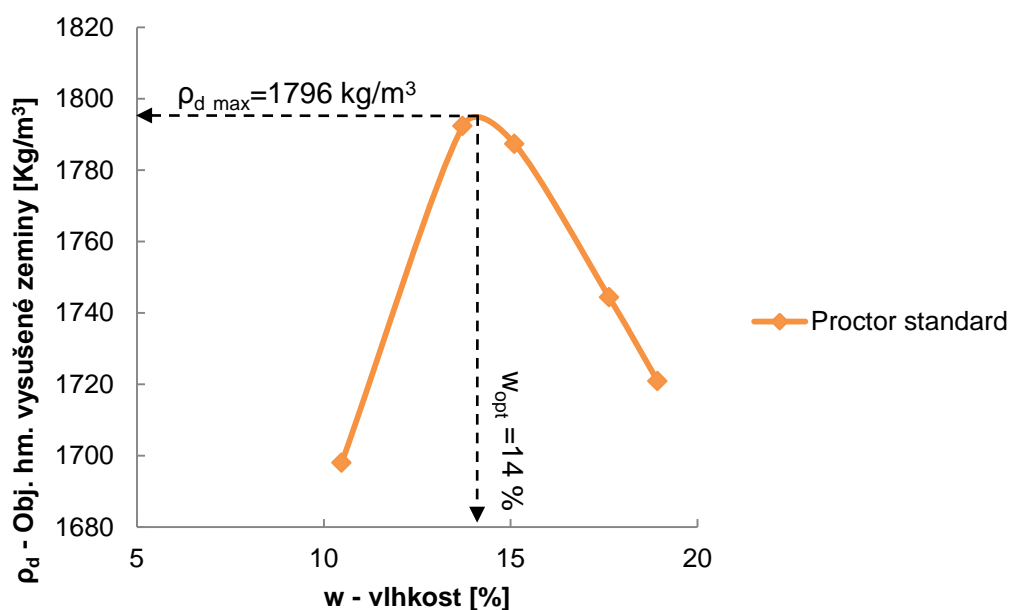
Zkouška Proctor standard		1	2	3	4	5
Hmotnost moždíře	g	6519,0	6519,0	6519,0	6519,0	6519,0
Hmo. moždíře+vlhká zemina	g	8287,0	8440,0	8458,0	8453,0	8448,0
Obj. hmotnost vlhké zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	1875,9	2038,2	2057,3	2052,0	2046,7
Hmotnost váženky	g	29,3	29,0	29,1	29,9	29,0
Hmo. váženky+vlhká zemina	g	182,2	178,2	185,3	204,0	181,0
Hmo. váženky+suchá zemina	g	167,7	160,2	164,8	177,9	156,8
Vlhkost zeminy	%	10,5	13,7	15,1	17,6	18,9
Obj. hmotnost suché zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	1698,0	1792,3	1787,3	1744,4	1720,9

**Výsledek laboratorní zkoušky**

Optimální vlhkost	%	14,0
Max. obj. hmo. suché zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	1790,0

**Místo:** Laboratoř ústavu pozemních komunikací, VUT v Brně

**Proctor standard**





**Příloha B: Stanovení zhutnitelnosti podle Proctor modifikovaný**  
 ČSN EN 13286-2

Objem moždíře	942cm <sup>3</sup>
Výška dopadu	457mm
Počet vrstev	5
Počet úderů na vrstvu	25

**Provedl:** Jan Grmela

**Vzorek:** F6CL

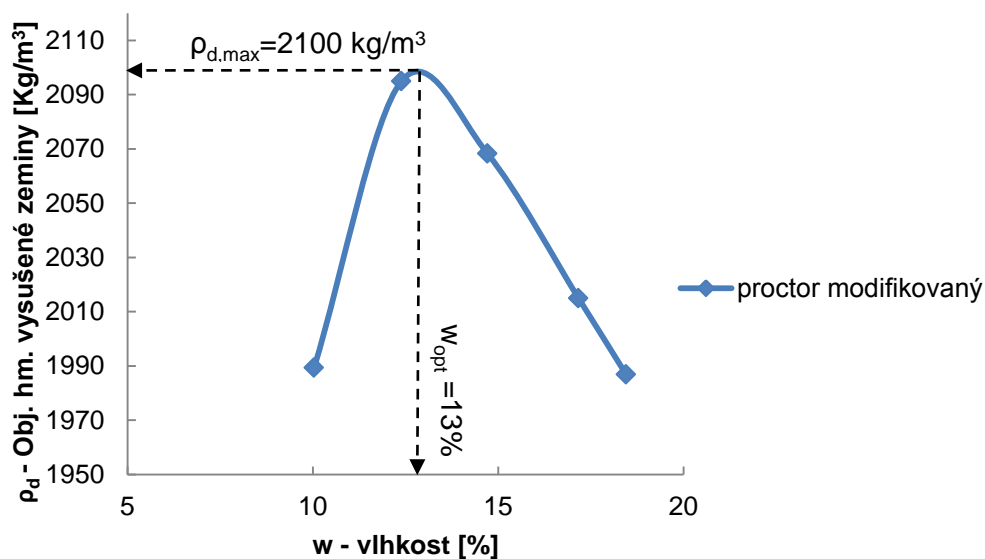
Zkouška Proctor modifikovaný		1	2	3	4	5
Hmotnost moždíře	g	6519,0	6519,0	6519,0	6519,0	6519,0
Hmo. moždíře+vlhká zemina	g	8582,0	8738,0	8755,0	8744,0	8737,0
Obj. hmotnost vlhké zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	2188,9	2354,4	2372,5	2360,8	2353,4
Hmotnost váženky	g	97,5	28,5	28,5	30,2	28,2
Hmo. váženky+vlhká zemina	g	251,1	125,6	126,0	148,3	145,7
Hmo. váženky+suchá zemina	g	237,1	114,9	113,5	131,0	127,4
Vlhkost zeminy	%	10,0	12,4	14,7	17,2	18,4
Obj. hmotnost suché zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	1989,4	2095,0	2068,3	2015,0	1986,8

**Výsledek laboratorní zkoušky**

Optimální vlhkost	%	13,0
Max. obj. hmo. suché zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	2100,0

**Místo:** Laboratoř ústavu pozemních komunikací, VUT v Brně

**Proctor modifikovaný**



**Příloha C: Zhutitelnost podle vibračního pěchu**  
ČSN EN 13286 – 4

Objem moždíře	778cm <sup>3</sup>
Počet vrstev	3
Počet úderů na vrstvu	1 min

**Provedl:** Jan Grmela

**Vzorek:** F6CL

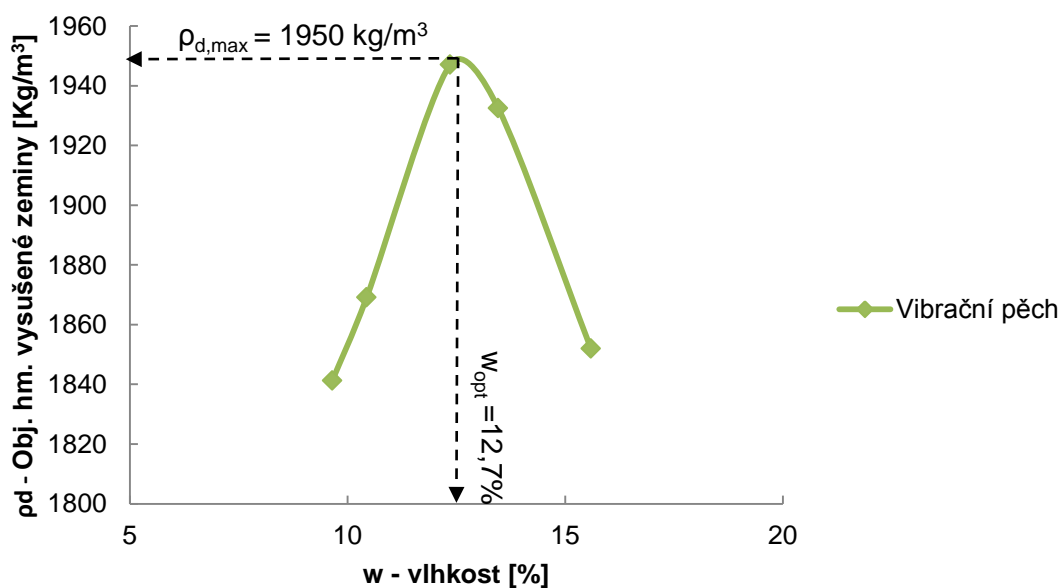
Zkouška vibrační pěch		1	2	3	4	5
Hmotnost moždíře	g	5444,0	5444,0	5444,0	5444,0	5444,0
Hmo. moždíře+vlhká zemina	g	7014,7	7050,0	7146,0	7149,9	7109,5
Obj. hmotnost vlhké zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	2018,9	2064,3	2187,7	2192,7	2140,7
Hmotnost váženky	g	18,7	17,1	29,3	17,7	18,6
Hmo. váženky+vlhká zemina	g	118,7	125,0	156,6	145,8	108,3
Hmo. váženky+suchá zemina	g	109,9	114,8	142,6	130,6	96,2
Vlhkost zeminy	%	9,6	10,4	12,4	13,5	15,6
Obj. hmotnost suché zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	1841,2	1869,1	1947,1	1932,5	1852,0

**Výsledky laboratorní zkoušky**

Optimální vlhkost	%	12,6
Max. obj. hmo. suché zeminy	Kg/m <sup>3</sup>	1950,0

**Místo:** Laboratoř ústavu pozemních komunikací, VUT v Brně

**Vibrační pěch**



**Příloha D: Výsledek měření okamžitého indexu únosnosti IBI**  
ČSN EN 13286 - 47

**Místo:** Laboratoř ústavu pozemních komunikací, VUT v Brně

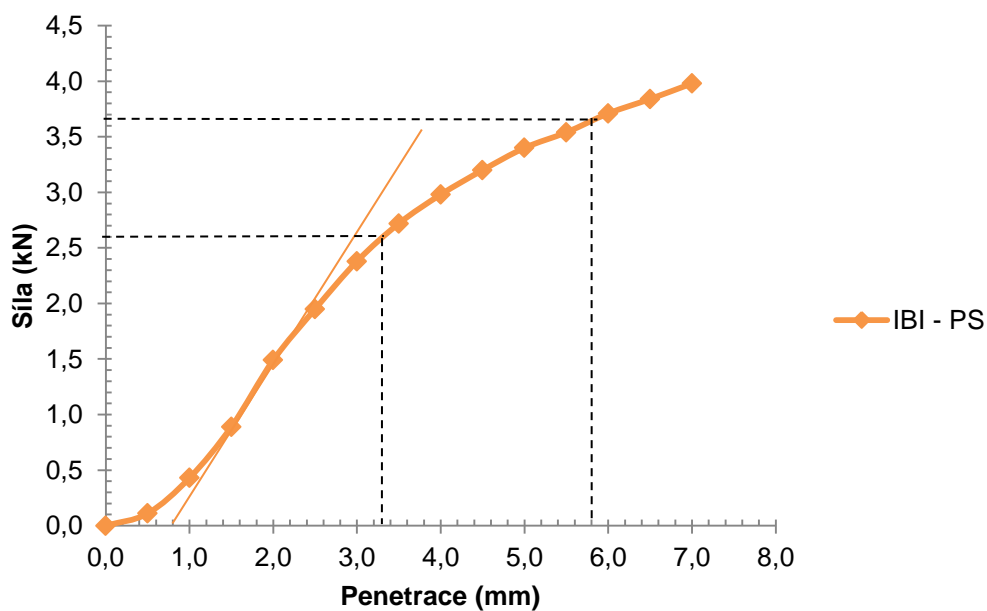
**Provedl:** Jan Grmela

**Hutnění podle:** Proctor standard

**Vzorek:** F6CL

**Vlhkost vzorku:** 14%

### IBI - PS



Penetrace po korekci (mm)	Síla (kN)	Standardní síla (kN)	IBI (%)
3,3	2,60	13,2	19,7
5,8	3,65	20,0	18,3

**Příloha E: Výsledek měření okamžitého indexu únosnosti IBI**  
ČSN EN 13286 - 47

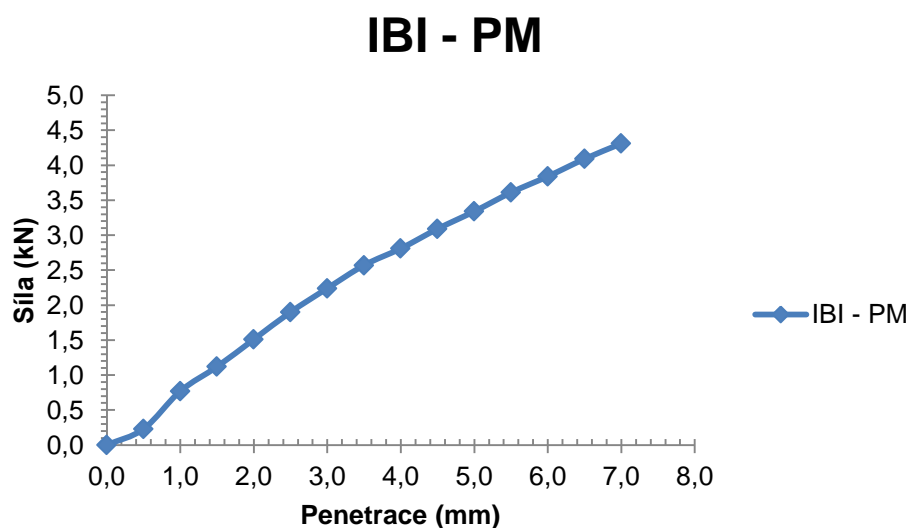
**Místo:** Laboratoř ústavu pozemních komunikací, VUT v Brně

**Provedl:** Jan Grmela

**Hutnění podle:** Proctor modifikovaný

**Vzorek:** F6CL

**Vlhkost vzorku:** 13%



Penetrace (mm)	Síla (kN)	Standardní síla (kN)	IBI (%)
2,5	1,90	13,2	14,4
5,0	3,34	20,0	16,7

**Příloha F: Výsledek měření okamžitého indexu únosnosti IBI**  
ČSN EN 13286 - 47

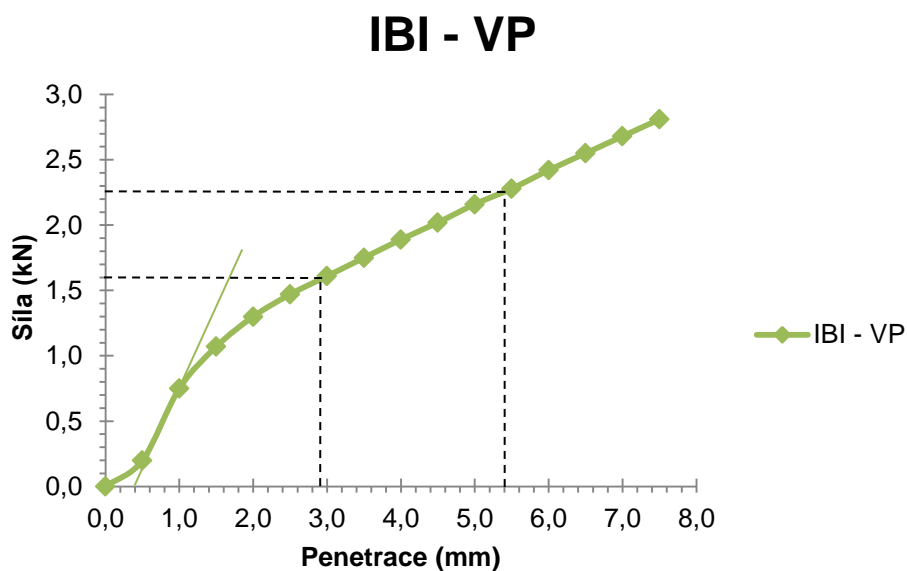
**Místo:** Laboratoř ústavu pozemních komunikací, VUT v Brně

**Provedl:** Jan Grmela

**Hutnění podle:** Vibrační pěch

**Vzorek:** F6CL

**Vlhkost vzorku:** 12,6%



Penetrace po korekci (mm)	Síla (kN)	Standardní síla (kN)	IBI (%)
2,9	1,60	13,2	12,1
5,4	2,26	20,0	11,3

**Příloha G: Výsledek měření Kalifornského poměru únosnosti CBR**  
ČSN EN 13286 - 47

**Místo:** Laboratoř ústavu pozemních komunikací, VUT v Brně

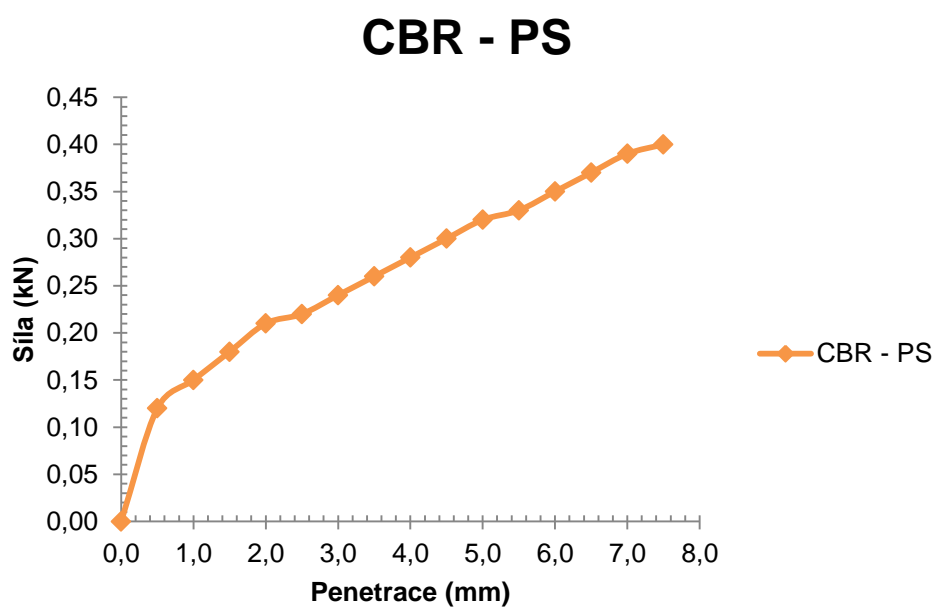
**Provedl:** Jan Grmela

**Hutnění podle:** Proctor standard

**Vzorek:** F6CL

**Vlhkost vzorku:** 14%

**Doba saturace:** 96 h



Penetrace (mm)	Síla (kN)	Standardní síla (kN)	CBR (%)
2,5	0,22	13,2	1,7
5,0	0,32	20,0	1,6

**Příloha H: Výsledek měření Kalifornského poměru únosnosti CBR**  
ČSN EN – 13286 - 47

**Místo:** Laboratoř ústavu pozemních komunikací, VUT v Brně

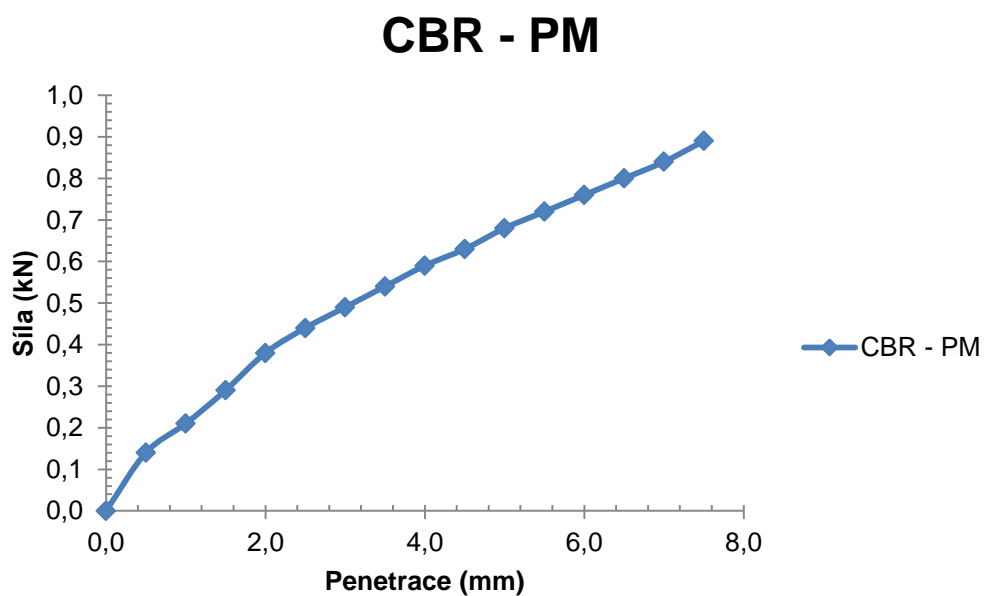
**Provedl:** Jan Grmela

**Hutnění podle:** Proctor modifikovaný

**Vzorek:** F6CL

**Vlhkost vzorku:** 13%

**Doba saturace:** 96 h



Penetrace (mm)	Síla (kN)	Standardní síla (kN)	CBR (%)
2,5	0,44	13,2	3,3
5,0	0,68	20,0	3,4

**Příloha I: Výsledek měření Kalifornského poměru únosnosti CBR**  
ČSN EN 13286 - 47

**Místo:** Laboratoř ústavu pozemních komunikací, VUT v Brně

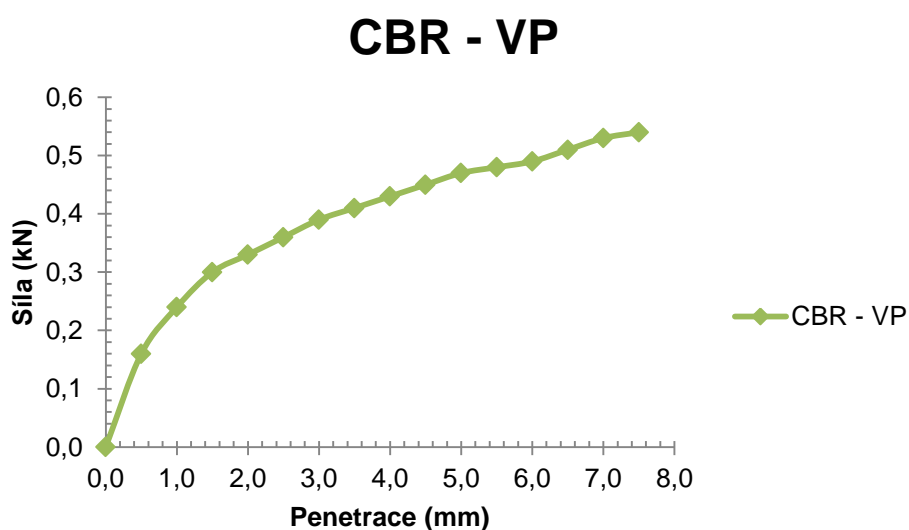
**Provedl:** Jan Grmela

**Hutnění podle:** Proctor modifikovaný

**Vzorek:** F6CL

**Vlhkost vzorku:** 12,6%

**Doba saturace:** 96 h



Penetrace (mm)	Síla (kN)	Standardní síla (kN)	CBR (%)
2,5	0,36	13,2	2,7
5,0	0,47	20,0	2,4